

Regelung magnetischer Führungen für lineare Transportsysteme

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität
Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

M. Sc. Alexander Spieß

aus Limburg an der Lahn

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. R. Nordmann
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. H. Birkhofer
Tag der Einreichung:	02. November 2010
Tag der mündlichen Prüfung:	18. Januar 2011

Darmstadt 2011
D17

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mechatronische Systeme im Maschinenbau der Technischen Universität Darmstadt.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Nordmann für seine Unterstützung bei der Anfertigung dieser Arbeit. Herrn Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing H. Birkhofer danke ich für die Unterstützung und die Übernahme des Korreferates.

Ich möchte mich bei allen Kollegen und Kolleginnen am Fachgebiet für die Unterstützung und das gute Arbeitsklima bedanken. Ein besonderer Dank gilt Christian Ehmann, Simon Kern, Kai Adler und Thomas Grönsfelder. Sie haben mir den Anfang am Institut ermöglicht und viele hilfreiche Hinweise zu Beginn der Arbeit gegeben. Weiterhin gilt mein Dank Norman Butzek, mit dem ich mir die ersten Jahre mein Büro teilte und mit dem ich viele Fragen, fachlich wie alltäglich, lang und ausgiebig diskutieren konnte. Philipp Beckerle und Robert Köhler danke ich für Ihre Geduld bei der Diskussion der fachlichen Fragen, die sich im Verlaufe der Arbeit stellten. Ein spezieller Dank gilt Markus Marszolek, mit dem ich lange Zeit das Labor teilte und gemeinsam dem Forscher- und Basteldrang nachgehen konnte. Gemeinsam haben wir unsere Arbeiten zum Abschluss gebracht. Geteiltes Leid war halbes Leid in der Endphase des Verfassens.

Den Mitarbeitern der mechanischen Werkstatt des Fachgebietes, Herrn Rausch und Herrn Rodenhäuser, danke ich für ihre Unterstützung bei dem Aufbau der Prüfstände. Sie waren immer mit Rat und Tat zur Stelle.

Ein großes Dankeschön gilt Ursula Willner, Sabine Backhaus und Birgit Lampert. Abseits des wissenschaftlichen Betriebes versuchen Sie Ordnung und Struktur in das Chaos zu bringen. Sie sind stets mit einem offenen Ohr für einen da.

Hiermit möchte ich mich bei den Studenten, Kun Quian, Yann Eberlen, Florian Kock, Ying Li und Hao Philipp bedanken. Durch ihre Arbeiten als Studien- und Diplomarbeiter, sowie als wissenschaftliche Hilfskräfte haben Sie zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Meinen Eltern danke ich für ihre Hilfe, ohne die der lange Weg all die Jahre nicht möglich gewesen wäre. Als letztes danke ich meiner Frau Anne, die das letzte Jahr viel Geduld und Nachsicht aufgebracht hat, als es auf die Zielgerade der Arbeit zuing. *Danke.*

Darmstadt, April 2011

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Einsatzgebiete der Magnetlagertechnik	2
1.2	Transportsysteme mit Magnetschwebetechnik	3
1.3	Zielsetzung und Gliederung der Arbeit	6
2	Magnetlager, Verhalten und Systemeigenschaften	8
2.1	Aufbau eines elektromagnetischen Lagers	8
2.2	Wirkprinzip des elektromagnetischen Aktors	9
2.3	Eigenschaften des Magnetlagers	12
2.3.1	Linearisierung des Verhaltens	12
2.3.2	Standardregelkreis und die Betrachtung der Stabilität	13
2.4	Betrachtung der Dynamik	16
2.5	Fazit	18
3	Der Prüfstand	19
3.1	Mechanischer Aufbau	19
3.1.1	Grundstruktur des Aufbaus	21
3.1.2	Platte mit Ankern	22
3.1.3	Strukturdynamische Eigenschaften der Platte	24
3.2	Elektromagnetische Führungen	25
3.2.1	Elektromagnete	26
3.2.2	Verstärker	27
3.3	Sensorik für die Positionsbestimmung der Platte	27
3.3.1	Induktive Wegsensoren für die z Position der Platte	27
3.3.2	Lasersensor für die x Position der Platte	28
3.4	Echtzeitsystem zur Regelung und Messdatenerfassung	29
3.4.1	Aufbereitung der Sensorsignale	29
4	Modellbildung des Transportsystems	32
4.1	Modellbildung der mechanischen Strecke	33
4.1.1	Simulation der Bewegung des Schwerpunktes in Transportrichtung	36
4.1.2	Mechanisches Gesamtmodell der bewegten Platte	39
4.2	Modellbildung der elektromagnetischen Aktoren	39
4.2.1	Modell der Dynamik	40
4.2.2	Modell für die Beziehung zwischen Kraft, Strom und Weg	42

4.3	Modell der Sensorik	46
4.4	Gesamtmodell des Transportsystems	46
4.5	Beurteilung der Modellgüte	47
5	Regelungsstrategie für das Transportsystem	50
5.1	Dezentrales Regelungskonzept und entstehende Trajektorie bei der Transportbewegung	50
5.1.1	Beschreibung des Transportvorgangs	51
5.1.2	Einfluss der überbestimmten Lagerung auf die Reglerstruktur . .	54
5.1.3	Verlauf der Trajektorie des Schwerpunktes der Platte	55
5.2	Systemverhalten und Eigenschaften	56
5.2.1	Einfluss der Anzahl aktiver Führungen	58
5.2.2	Einfluss der Lastverteilung	58
5.2.3	Einfluss der nichtlinearen Aktoren	59
5.2.4	Verlauf der Eigenschaften bei der Transportbewegung	60
5.3	Beeinflussung des Systemverhaltens	65
5.4	Funktionsweise des Gain Scheduling Verfahrens	68
5.4.1	Beschreibung des Verfahrens	68
5.5	Randbedingungen des Verfahrens	71
5.5.1	Wahl der Schrittweite	71
5.5.2	Wahl des Referenzpunktes	71
5.5.3	Beeinflussung der Sensorsignale durch die Transportbewegung . .	72
5.6	Fazit	72
6	Anwendung des Verfahrens und experimentelle Validierung	73
6.1	Validierung am Modell	73
6.2	Validierung am Prüfstand	74
6.3	Beurteilung der Ergebnisse und Fazit	77
7	Zusammenfassung	79
	Literaturverzeichnis	81

Symbolverzeichnis

Griechische Buchstaben

β	Drehung der Platte um die Z-Achse
Δx	Abstand der Führungen
μ	Permeabilität
μ_0	absolute Permeabilität im Vakuum
μ_r	relative Permeabilität
ω_ρ	Frequenz der Starrkörpermode in Richtung ρ
ω_φ	Frequenz der Starrkörpermode in Richtung φ
ω_z	Frequenz der Starrkörpermode in Richtung z
ϕ	magnetischer Fluss
ρ	Drehung der Platte um die Y-Achse
Θ	Durchflutung
θ_x	Massenträgheit um die x Achse
θ_y	Massenträgheit um die y Achse
φ	Drehung der Platte um die X-Achse

Lateinische Buchstaben

A	Systemmatrix
B	Eingangsmatrix
C	Ausgangsmatrix
D	Durchgangsmatrix
G_s	Übertragungsfunktionen des mechanischen Systems im Schwerpunkt

$\mathbf{G}_{\text{Sensor}}$	Übertragungsfunktion der Sensoren
\mathbf{G}_{mech}	Matrix der Übertragungsfunktionen des mechanischen Systems
$\mathbf{K}_{\text{Sensor}}$	Verstärkungsfaktoren der Sensoren
\mathbf{M}	Massenmatrix
\mathbf{T}_f	Transformationsmatrix der Kräfte
\mathbf{T}_q	Transformationsmatrix der Auslenkungen
$\omega_x, \omega_{1,2}$	Kennkreisfrequenz der Notchfilter
\underline{F}_l	Vektor der Kräfte an den Lagerstellen
\underline{F}_s	Vektor der Kräfte im Schwerpunkt
\underline{q}_l	Vektor der Auslenkungen an den Lagerstellen
\underline{q}_s	Vektor der Auslenkungen im Schwerpunkt
$\underline{u}(t)$	Eingangsvektor
$\underline{x}(t)$	Zustandsvektor
$\underline{y}(t)$	Ausgangsvektor
A	Polfläche
a_1	Position der Führung 1 in Transportrichtung
a_2	Position der Führung 2 in Transportrichtung
a_3	Position der Führung 3 in Transportrichtung
a_4	Position der Führung 4 in Transportrichtung
a_5	Position der Führung 5 in Transportrichtung
a_6	Position der Führung 6 in Transportrichtung
B	magnetische Flussdichte
C	Übertragungsfunktion des Reglers
c_i	I Anteil des Reglers
C_{mn}	Parameter des Polynoms
D	Kerböffnungsbreite der Notchfilter

d	Störgröße
e	Regelabweichung
F	Kraft
F_1	Lagerkraft der Führung 1
F_2	Lagerkraft der Führung 2
F_3	Lagerkraft der Führung 3
F_4	Lagerkraft der Führung 4
F_5	Lagerkraft der Führung 5
F_6	Lagerkraft der Führung 6
F_G	Gewichtskraft der Platte
F_m	Magnetkraft
F_y	Magnetkraft in y Richtung
F_z	Magnetkraft in z Richtung
F_{ref}	Referenzkraft am Referenzpunkt
G	Übertragungsfunktion der Regelstrecke
G_0	Übertragungsfunktion der offenen Strecke
G_{Aktor}	Übertragungsfunktion des Aktors
H	magnetische Feldstärke
i	Strom
i_0	Strom am Arbeitspunkt
I_{ist}	Iststrom
I_{soll}	Sollstrom
j	Nummer der Führung, Regelkreis
k_d	D Anteil Regler
k_i	Kraft–Strom– Faktor
k_p	P Anteil Regler

k_s	Kraft–Weg–Faktor
k_z	Gesamtsteifigkeit des Freiheitsgrades z
k_ρ	Gesamtsteifigkeit des Freiheitsgrades ρ
k_φ	Gesamtsteifigkeit des Freiheitsgrades φ
k_{C1}	Gesamtsteifigkeit der Führung 1
k_{C3}	Gesamtsteifigkeit der Führung 3
k_{C5}	Gesamtsteifigkeit der Führung 5
k_{iref}	Kraft–Strom–Faktor Referenzpunkt
k_{sref}	Kraft–Weg–Faktor am Referenzpunkt
L	Induktivität
l_5	Halbe Breite der Platte
l_6	Halbe Breite der Platte
L_A	halbe Länge einer Führung
L_P	Länge der Platte
L_S	Überlappungslänge des Sensors
l_{Fe}	Länge des Eisenkerns
$m \times n$	Dimension der Transformationsmatrizen
m	Masse
m_i	Massen der Einzelteile der Platte
m_z	Gesamtmasse der Platte
N	Anzahl der Windungen
P	Übertragungsfunktion der Notchfilter
Q	Minimale Verstärkung der Notchfilter
R	Widerstand
s	Luftspalt
s_0	Luftspalt am Arbeitspunkt

s_1, s_2	Pole
T	Führungsübertragungsfunktion
T_A	Zeitkonstante des Aktors
T_f	Zeitkonstante der Tiefpassfilter
T_n	Einschwingdauer des Notchfilters
u	Spannung
V	Volumen
W	Energie
w	Sollgröße
x	Auslenkung der Platte in x Richtung, Transportrichtung
x_A	Auslenkung am Arbeitspunkt
x_s	Position des Schwerpunktes der Platte in Transportrichtung
y	Auslenkung der Platte in y Richtung
z	Auslenkung der Platte in z Richtung
z_s	Auslenkung des Schwerpunktes der Platte in z Richtung
z_{ref}	Referenzauslenkung am Referenzpunkt
z_{spi}	Lage der Schwerpunkte der Einzelteile der Platte in z Richtung

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schnittdarstellung des Transrapids [50]	4
1.2	Prototyp-Magnetführung Universität Hannover [41]	4
1.3	Magnetgeführte Vorschubachse der RWTH Aachen [52]	5
1.4	Magnetführung der Universität Seoul [32]	5
2.1	Aufbau eines Magnetlagers	9
2.2	Kennlinien eines elektromagnetischen Aktors	13
2.3	Standardregelkreis eines Magnetlagers	14
2.4	Pol-Nullstellendiagramme	15
2.5	Ersatzschaltbild des magnetischen Kreises	17
3.1	Foto des Prüfstandes	20
3.2	CAD Modell des Prüfstandes	21
3.3	Skizze der Platte mit geblechten Anker	22
3.4	Wirkung der Seitenführungskräfte	23
3.5	Starrkörpermode bei 215 Hz	25
3.6	Starrkörpermode bei 227 Hz	25
3.7	Starrkörpermode bei 345 Hz	26
3.8	Blechschnitt EI 130	26
3.9	Sensorkennlinie Welotec <i>iwpb60 B100 AA k</i>	28
3.10	Amplituden- und Phasengang des eingesetzten Filters	31
4.1	Mechatronisches Gesamtsystem	33
4.2	Koordinatensystem an der Platte	34
4.3	Ablauf der Manipulation der Transformationsmatrizen	38
4.4	Blockschaltbild des mechanischen Modells	39
4.5	Messkette zur Messung der Übertragungsfunktion eines elektromagnetischen Aktors	40
4.6	Dynamik eines Aktors am nominellen Arbeitspunkt	41
4.7	Prüfstand zur Vermessung des Kraftkennfeldes	42
4.8	Gemessenes Kennfeld eines elektromagnetischen Aktors	44
4.9	Vergleich der Messdaten mit der approximierten Lösung des Polynoms	45
4.10	Relativer Fehler der approximierten Lösung	45
4.11	Gesamtmodell des Aktors	46
4.12	Blockschaltbild des Gesamtmodells	47
4.13	Vergleich der Verläufe der Auslenkung zwischen Simulation und Messung	48

4.14	Vergleich der Verläufe der Auslenkung zwischen Simulation und Messung	49
5.1	Blockschaltbild des Regelkreises für einen Lagerfreiheitsgrad	51
5.2	Draufsicht der Platte mit vier Führungen	51
5.3	Darstellung des Transportvorgangs für unterschiedliche Positionen der Platte	52
5.4	Maximal möglicher Aktorabstand	53
5.5	Überbestimmter Lagerungszustand	54
5.6	Verlauf der Trajektorie des Schwerpunktes	56
5.7	Einfluss der Transportbewegung auf die Eigenschaften des Systems	57
5.8	Verlauf der Lagerkräfte	59
5.9	Verläufe der Steifigkeiten $k_\varphi(x_s)$ und $k_z(x_s)$	61
5.10	Verlauf der Steifigkeit $k_\rho(x_s)$	62
5.11	Verlauf der Eigenfrequenzen der Starrkörpermoden	63
5.12	Verlauf der Koordinate z_s des Schwerpunktes	65
5.13	Verlauf des Winkels ρ des Schwerpunktes	66
5.14	Blockschaltbild eines Regelkreises mit dem Gain Scheduling Verfahren	67
5.15	Ablauf des Adaptionverfahrens	69
5.16	Verlauf der Parameter k_{pj} über x_s	70
6.1	Vergleich der Auslenkung der Simulation mit und ohne Adaption	74
6.2	Vergleich des Winkels der Simulation mit und ohne Adaption	75
6.3	Vergleich der Auslenkung der Messung mit und ohne Adaption	76
6.4	Vergleich des Winkels der Messung mit und ohne Adaption	77

Tabellenverzeichnis

3.1	Bauteile der Platte	23
3.2	Daten des Leistungsverstärkers MBE8-50	27
4.1	Parameter der Bewegungsgleichung	35
4.2	Bauteile der Messeinrichtung	43
5.1	Längen am Prüfstand	54

1 Einleitung

Die Funktionen des Tragens und Führens sind bei einem Transportsystem essentiell. Ferner bestimmen Kriterien, wie Positioniergenauigkeit, Transportgeschwindigkeit, maximale Traglasten, Platzangebot und Kosten, welche Verfahren zur Lagerung des zu transportierenden Objektes gewählt werden. Allen Transportsystemen ist gemein, dass die Kräfte zum Tragen und Führen zwischen dem Transportsystem und dem Transportgut übertragen werden müssen. Bei konventionellen Systemen werden die Lagerkräfte durch Kontakt übertragen, was zur Folge hat, dass durch Reibung und Verschleiß Partikel in der Transportumgebung entstehen. Gegenwärtig gibt es Einsatzszenarios von Transportsystemen in bestimmten Produktionsumgebungen, sei es bei der Herstellung von Halbleitern, bei der Produktion von Solarzellen oder bei der Beschichtung von Displays für Monitore und Fernsehgeräte, bei denen Partikelfreiheit, neben den Hauptanforderungen des Tragens und Führens, ein elementares Kriterium zur Auswahl ist.

Partikelfreiheit spielt heutzutage, wie in [23] beschrieben, bei der Herstellung von Displays für Monitore und Fernseher eine wichtige Rolle. Die Größe der Glassubstrate ist aufgrund der stetig anwachsenden Diagonale von Monitoren und Fernsehgeräten soweit angestiegen, dass aus Stabilitätsgründen diese nicht mehr, wie früher, stehend durch berührende Lager geführt werden können, sondern hängend transportiert werden müssen. Werden die Glassubstrate mit konventioneller Lagertechnik hängend gelagert, kann es passieren, dass Abrieb in den Beschichtungsprozess gelangt und dies zu fehlerhaften Produkten führt. In solchen Fällen haben Magnetlager durch ihre berührungslose Lagerung und der damit verbundenen Verschleißfreiheit, Abriebsfreiheit und Schmiermittelfreiheit, Vorteile gegenüber berührenden Lagerungskonzepten.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird ein magnetgelagertes Transportsystem betrachtet, das für den Transport von Glassubstraten im Vakuum konzipiert wurde. Aus diesem Einsatzgebiet ergeben sich Vorgaben für den Aufbau des Systems, um einen Betrieb im Vakuum zu ermöglichen. Die Auswirkungen, welche die gewählte Bauweise auf die Lagerung des Transportobjektes während der Transportbewegung hat, werden analysiert und dargestellt. Es wird ein Regelungskonzept vorgestellt, mit dem eine konstante Transportbewegung des Objektes möglich ist. Abschließend wird an einem, während dieser Arbeit entstandenen Prüfstand experimentell nachgewiesen, dass das entwickelte Regelungsverfahren in der Lage ist, eine konstante Trajektorie des Transportobjektes über den gesamten Transportweg zu ermöglichen.

1.1 Einsatzgebiete der Magnetlagertechnik

Die Technik der Magnetlagerung ist schon seit Jahrzehnten bekannt. 1934 reichte Hermann Kemper ein Patent [20] beim deutschen Patentamt ein, in dem das Prinzip einer Magnetschwebbahn dargestellt wird. In den vergangenen Jahrzehnten hat die Magnetlagertechnik, mit den immer kleiner und kostengünstiger werdenden Bauteilen für Verstärker und digitale Regler, Anwendung in unterschiedlichen Bereichen der Technik gefunden. Die Anwendungen für Magnetlager sind oft auf die Eigenschaft der berührungslosen Lagerung zurückzuführen. Daraus ergeben sich eine Reihe von Vorteilen, wie zum Beispiel:

- Verschleißfreiheit und Wartungsfreiheit
- Abriebfreiheit und Schmiermittelfreiheit
- Lagerung von Objekten durch eine gekapselte Ummantelung

Weiterhin sind die Einstellungen von Lagerparametern, wie Steifigkeit und Dämpfung und die Überwachung von Größen des gelagerten Prozesses Kriterien, die zum Einsatz von Magnetlagern führen.

Die berührungslose Magnetlagertechnik findet bei der Lagerung hochdrehender Rotoren eine Anwendung [31]. Ein Einsatzgebiet mit hochdrehenden Rotoren sind Turbomolekularpumpen, wie in der Patentschrift [3] von 1982 beschrieben wird. Des Weiteren findet die Magnetlagertechnik Anwendung im Bereich der Lagerung von Spindeln in Werkzeugmaschinen zur Erhöhung der Prozessstabilität [21] und der Produktivität [27]. Aufgrund der Möglichkeit, die entstehenden Lagerkräfte und Auslenkungen messen zu können, werden Magnetlager zur Fehlerdiagnose und zur Prozessüberwachung eingesetzt. Dies wurde in den Arbeiten [6] und [1] an Beispielen zur Fehlerdiagnose an einer Kreiselpumpe mit aktiven Magnetlagern gezeigt. Ein weiteres Anwendungsgebiet, das den Vorteil der erfassbaren Größen, wie Lagerkraft und Auslenkung nutzt, ist die Forschung an Gleitlagerungen und Quetschfilmdämpfern. In der Arbeit [25] wird die Dynamik turbulenter Gleitlager mit Hilfe aktiver Magnetlager identifiziert. Die Arbeit [29] beschreibt Untersuchungen an Quetschfilmdämpfern mittels Magnetlagern. Ein weiteres Beispiel für die Anwendung der magnetischen Lagerung, sowohl als Aktor als auch als Sensor, beschreibt die Arbeit [11], in der dynamische Untersuchungen an rotierenden Strukturen mittels Magnetlagern durchgeführt wurden. Bei allen genannten Anwendungsfällen findet der Vorgang der Lagerung ortsfest statt. Die Bewegung, des zu lagernden Objektes, beschränkt sich auf die Rotation einer Welle innerhalb des Lagers. Dies ist bei magnetgelagerten, linearen Transportsystemen nicht der Fall, da hierbei das zu lagernde Objekt nicht ortsfest ist, sondern eine Transportbewegung ausführt.

1.2 Transportsysteme mit Magnetschwebetechnik

Magnetgelagerte Transportsysteme haben die Aufgabe, massebehaftete Körper entgegen der Gravitation in der Schwebelage zu halten und entlang einer konstruktiv vorgegebenen Bahn zu führen. Dazu sind gerichtete Kräfte notwendig, die mittels magnetischer Lager berührungslos übertragen werden können. Bei Transportsystemen ist die Hauptbewegung meist translatorisch ausgeführt. Daher passt der Begriff magnetische Führung, wie in der Arbeit [41] vorgeschlagen, besser auf dieses Einsatzgebiet, als der Begriff der magnetischen Lagerung. Dieser wird in der Literatur meist auf rotatorische Freiheitsgrade bezogen, angewendet. In dieser Arbeit wird daher der Begriff der magnetischen Führung verwendet.

Die berührungslose Kraftübertragung ist der Hauptgrund, warum magnetische Transportsysteme eingesetzt werden. Die daraus entstehende Partikelfreiheit prädestiniert solche Systeme für den Einsatz unter besonderen Bedingungen, wie z.B. Vakuumumgebungen und Reinräume. Für bestimmte Einsätze ist es ein entscheidendes Kriterium, dass die berührungslose Führung hohe Geschwindigkeiten bei translatorischen Bewegungen ermöglichen kann.

Im Wesentlichen lassen sich die Transportsysteme mit Magnetschwebetechnik in zwei Kategorien unterteilen. In der ersten Kategorie befinden sich die Systeme, bei welchen sich alle aktiven Teile, die zur Erzeugung der Lagerkräfte benötigt werden, an dem bewegten Objekt befinden und die bei der Transportbewegung des Objektes mitgeführt werden. Der passive Teil wird durch die ortsfeste Schiene gebildet, an der das System entlang fährt. Bei der Transportbewegung erfährt der Schwerpunkt des Objektes, relativ zu den mitbewegten magnetischen Führungen, keine Änderung. Die Kraftangriffspunkte der Führungen bleiben konstant, wodurch das Systemverhalten unabhängig von der Position des bewegten Objektes ist. Für diese Kategorie gibt es einige Beispiele in der Literatur. Die wohl bekannteste für lineare magnetgeführte Systeme, bei denen die aktiven Teile mitbewegt werden, stellt der Transrapid dar (Abbildung 1.1). Hier werden sogenannte *Magnetische Räder* [12], die einzeln über Feder- und Dämpferelemente am bewegten Zugkörper aufgehängt sind, verwendet. Diese können anziehende Kräfte entgegen der Gravitation erzeugen. Für die seitliche Führung sind aktive Elektromagnete in Differenzanordnung am Zugkörper angebracht. Bei dieser Anwendung der Magnettechnik spielt die hohe zu erreichende translatorische Geschwindigkeit des bewegten Objektes eine entscheidende Rolle. In [41] wird ein Prototyp eines Werkzeuggestes mit Magnetführungen beschrieben, bei dem die Tragsmagnete am bewegten Tisch befestigt sind. Die Schiene ist als rein passives System ausgelegt (Abbildung 1.2). Dieses System dient an der Universität Hannover als Versuchsträger für die Untersuchung von Regelungskonzepten. An der RWTH Aachen entstand eine Magnetführung, die als nächster Entwicklungsschritt der oben genannten Führung angesehen werden kann. Hier wurde ein hochdynamischer Vorschubantrieb für die Transportbewegung integriert und dessen Verhalten untersucht.

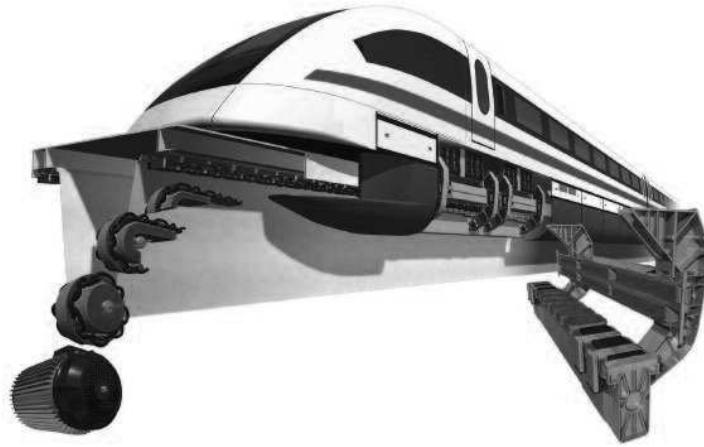


Abbildung 1.1: Schnittdarstellung des Transrapids [50]

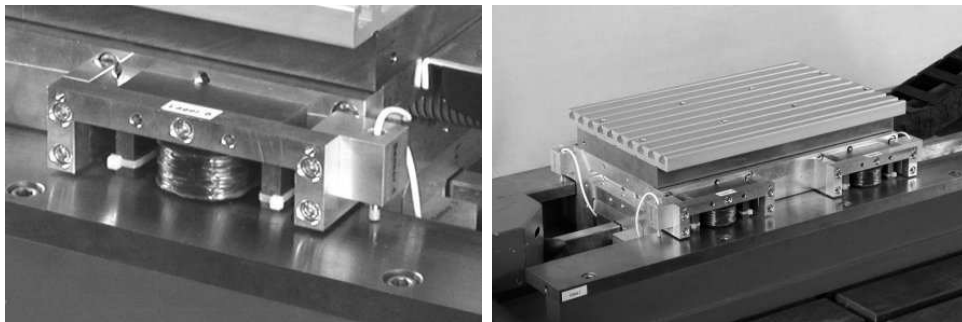


Abbildung 1.2: Prototyp-Magnetführung Universität Hannover [41]

An der Universität Seoul wurde eine Führung entwickelt, die an die Anforderungen der Halbleiterindustrie angepasst wurde. Diese kann in zwei Achsen 150 Millimeter verfahren und ist mit Hybridmagneten gelagert. Eine Darstellung ist in Abbildung 1.4 zu sehen. Ähnliche Beispiele, wie die zuvor genannten, lassen sich in den Arbeiten [13], [42], [2] und [44] finden. Das Patent [46] beschreibt ein Transportsystem, das auf der Basis von Permanentmagneten mit abstoßenden Kräften arbeitet. Da das zu lagernde Objekt nicht in allen sechs Freiheitsgraden mit Permanentmagneten stabilisiert werden kann, wie in [9] dargestellt, werden entweder Rollenführungen oder aktiv geregelte Elektromagnete genutzt.

Allen genannten Systemen ist die Tatsache gemein, dass zur Erzeugung der Kräfte, Energie auf das bewegte Objekt übertragen werden muss. Im Falle des Transrapid wird dies durch die Umwandlung von kinetischer Energie in elektrische Energie durch Lineargeneratoren erreicht [53]. Für den Anwendungsfall von Transportsystemen in Produktionsumgebungen reichen die Transportgeschwindigkeiten für diese Lösung nicht aus [42]. Die genannten Beispiele aus der Transporttechnik für Produktionssysteme, schaffen Ab-

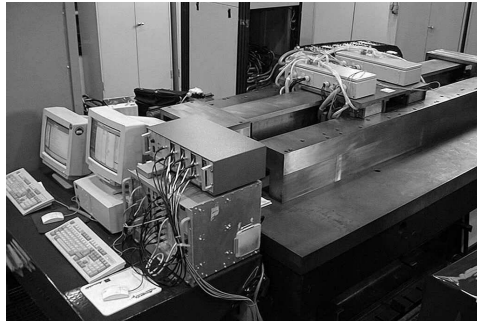


Abbildung 1.3: Magnetgeführte Vorschubachse der RWTH Aachen [52]

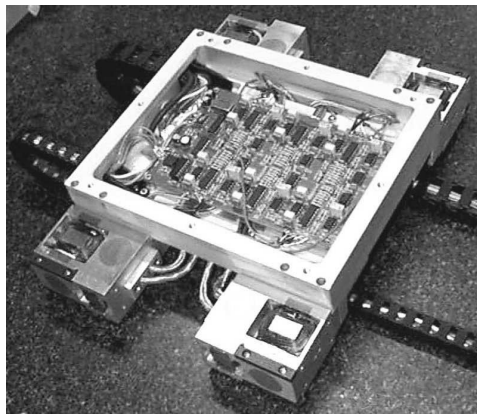


Abbildung 1.4: Magnetführung der Universität Seoul [32]

hilfe für dieses Problem durch Schleppkabel, die mit dem bewegten Objekt mitgeführt werden. Für einen Einsatz im Reinraum ist dies jedoch keine geeignete Lösung, da die Kontaktfreiheit eine der wichtigsten Kriterien für den Einsatz der Magnetführung ist. Einen Lösungsansatz wird in der Arbeit [35] geboten. Hier wird die Energieversorgung des aktiven, bewegten Objektes mittels einer Batterie sichergestellt, wobei dies nur zu einer temporären Unabhängigkeit verhilft.

Einen Lösungsansatz für das Problem der Energieübertragung bieten Transportsysteme, die in die zweite Kategorie fallen. Hierbei wird das bewegte Objekt rein passiv ausgeführt. Der aktive Teil, wie magnetische Führungen und Sensoren, sitzt ortsfest entlang der Bahn und bilden die Schiene. Die Energie zur Erzeugung der Lagerkraft wird an die ortsfesten Aktoren geführt. Es entfällt die Notwendigkeit einer Verbindung zum passiven, bewegten Objekt, um die Energieübertragung zu gewährleisten. Diese Ausführungsart bewährt sich besonders bei Anwendungen in Reinräumen und unter Vakuumbedingungen, da vollständig berührungslos gearbeitet wird und überdies die Möglichkeit besteht, die sich an den Aktoren bildende, Abwärme durch die feststehende Schiene abzuleiten. Ein Anwendungsbeispiel ist in der Arbeit [45] zu finden, in der eine Platte unter Va-

kuumbedingungen in einem hermetischen, gekapselten Tunnel transportiert wird. Die Aktoren und Sensoren sind außerhalb des Tunnels installiert und wirken durch die Kapselung. Ein Nachteil dieser Lösung ist, dass die maximale Größe des zu transportierenden Objektes durch den Querschnitt des Tunnels bestimmt wird. Eine andere Bauform, vorgestellt in [38], ermöglicht die berührungslose Positionierung eines Kolbens im Inneren eines unter Vakuum gehaltenen Rohres über außerhalb des Rohres angebrachte Aktoren. Das zu transportierende Objekt ist an der Spitze einer Lanze befestigt. Bei dieser Lösung beschränkt sich der Transportweg auf den Hub des Kolbens im Zylinder. Der Nachteil der Bauweise mit feststehendem, aktiven Teil und passivem, bewegtem Objekt, gegenüber den Systemen der ersten Kategorie, ergibt sich durch die Änderung des Systemverhaltens während des Transportvorganges. Das bewegte Objekt verändert seine Position relativ zu den Kraftangriffspunkten der Führungen. Die Hebelarme zwischen den aktiven Führungen und dem Schwerpunkt verändern sich, was zu einer Änderung des Systemverhaltens führt. Es kommt zu einem ungleichmäßig ablaufendem Transportvorgang für das zu transportierende Objekt. Die Änderung des Systemverhaltens hängt von dem Verhältnis der Aktorabstände zu der Länge des zu transportierenden Objekts ab. Je kleiner die Abstände zwischen den aktiven Führungen gewählt werden, desto mehr Führungen sind zu jeder Position am bewegten Objekt im Eingriff. Die relative Änderung des Systemverhaltens wird durch eine steigende Zahl an aktiven Führungen verkleinert. Es werden mehr aktive Führungen benötigt, um die Beeinflussung der Transportbewegung aus der Bauweise des Systems zu minimieren, als für die eigentliche statische Lagerung des zu transportierenden Objektes nötig sind. Eine größere Anzahl an Führungen bedeutet jedoch eine Steigerung der Kosten, da mehr Aktoren, Sensoren und Leistungsverstärker benötigt werden.

1.3 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Der Ausgangspunkt für diese Arbeit ist der Ansatz, ein Regelungskonzept für ein magnetgeführtes Transportsystem, dessen Konzept für die Bauweise und die Auslegung der elektromagnetischen Führungen in der Arbeit [23] beschrieben sind, mit feststehendem aktivem Teil und bewegtem, passivem Teil zu entwerfen. Dabei ist das Ziel, die im System vorhandenen aktiven Führungen zu nutzen, um die aus der Bauweise entstehenden Veränderungen des Systemverhaltens zu kompensieren und einen konstanten Transportverlauf für das zu bewegende Objekt zu ermöglichen. Als Randbedingung für das Ziel, gilt es nur so viele Führungen zu verwenden, wie für die Führung und Übergabe des Transportobjektes zwischen den einzelnen Führungen unbedingt notwendig sind.

Der Aufbau dieser Arbeit orientiert sich an den im Folgenden aufgeführten Schritten des gewählten Lösungsweges:

Analyse des Verhaltens elektromagnetischer Aktoren In Kapitel zwei werden die Ei-

enschaften von Magnetlagern dargestellt, da diese das zentrale Element in dem Aufbau des Transportsystems sind und deren Verhalten einen großen Beitrag zum Gesamtverhalten des Systems liefert.

Beschreibung des Transportsystems In Kapitel drei wird der Aufbau, des während dieser Arbeit entstandenen Prüfstandes beschrieben. Dieser wird genutzt, um zum einen ein entwickeltes Simulationsmodell eines Transportsystems zu validieren und zum anderen das Regelungskonzept, welches am Modell entwickelt wird, zu testen.

Aufbau eines Simulationsmodells In Kapitel vier wird der Aufbau, des während dieser Arbeit entstandenen Simulationsmodells des Transportsystems beschrieben. Es wird auf die Modellierung der einzelnen Teilsysteme eingegangen und eine Validierung des Modells am Prüfstand durchgeführt.

Analyse des Systemverhaltens und Erarbeitung eines Regelungskonzeptes Im fünften Kapitel werden, ausgehend von einem dezentralen Regelungskonzept, die Eigenschaften des Transportsystems erläutert. Es wird auf die Zusammenhänge zwischen den Änderungen der Einflüsse durch die Transportbewegung auf das Systemverhalten eingegangen. Im Anschluss an die Beschreibung der Eigenschaften wird eine Regelungsstrategie vorgestellt, die es ermöglicht, die sich ändernden Einflüsse zu berücksichtigen und zu kompensieren.

Anwendung des Verfahrens und experimentelle Untersuchungen In Kapitel sechs wird das entwickelte Regelungskonzept an dem Simulationsmodell getestet und die Wirksamkeit untersucht, mit der die Änderungen des Systemverhaltens unterdrückt werden können. Im Anschluss daran, werden experimentelle Untersuchungen am Prüfstand durchgeführt, um zu testen, ob das Regelungsverfahren in der praktischen Anwendung die gleiche Wirksamkeit besitzt.

2 Magnetlager, Verhalten und Systemeigenschaften

Für den Betrieb des Transportsystems werden Führungen benötigt, die die notwendigen Haltekräfte für die Tragefunktion erzeugen. Die Anforderungen berührungslos und große Kräfte werden durch Führungen mit elektromagnetischen Aktoren erfüllt. Diese können berührungslos Kräfte über einen mehrere Millimeter großen Luftspalt ohne Kontakt an den Lagerstellen übertragen. Die Kraft entsteht nach dem Reluktanzprinzip im Luftspalt zwischen Stator und Anker an den Trennflächen von Gebieten unterschiedlicher Permeabilität. Elektromagnetische Aktoren besitzen systembedingt eine Steifigkeit mit negativer Kennlinie. Dies führt im ungeregelten Fall zu einem instabilen System. Daher muss ein Magnetlager mit elektromagnetischen Aktoren geregelt betrieben werden, wie in [28] und in [29] beschrieben.

Die speziellen Eigenschaften und die Funktionsweise der geregelten elektromagnetischen Führungen haben einen großen Einfluss auf das Verhalten des gesamten Transportsystems. Um ein umfassendes Systemverständnis zu erlangen ist es wichtig, die grundlegenden Zusammenhänge in Bezug auf die elektromagnetischen Aktoren zu kennen. Daher werden in diesem Kapitel die Grundlagen näher erläutert.

2.1 Aufbau eines elektromagnetischen Lagers

Eine Übersicht über die Bauformen von Magnetlagern findet sich in [49]. Prinzipiell besteht ein Magnetlager wie in Abbildung 2.1 dargestellt aus den Komponenten:

Stator Der Stator trägt die Spule und ist in vielen Fällen *geblecht* ausgeführt, um Wirbelströme in dem elektrisch leitenden Material zu minimieren. Wirbelströme schränken die Kraftdynamik der Aktoren, wie in [24] beschrieben, ein und sind deshalb zu vermeiden.

Spule Die stromdurchflossene Spule erzeugt, das für die Reluktanzkräfte notwendige magnetische Feld. Die Spulen sind meistens durch Vergussmasse auf den Statoren befestigt.

Anker Der Anker wird ebenso wie der Stator aus Stahlblechen hergestellt, um die Verluste durch Wirbelströme zu verringern. Hierüber wird der magnetische Rückschluss hergestellt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Blechung des Ankers senkrecht zur Hauptflussrichtung ausgerichtet ist [24].

Wegsensor Freie Massen, die durch eine magnetische Lagerung in ihren Freiheitsgraden positioniert werden sollen, müssen aktiv geregelt werden. Die Wegsensoren liefern ein Positionssignal das einem Regler als Regelgröße zugeführt wird.

Regler Der Regler bestimmt mittels der gemessenen Positionssignale des Sensors einen Sollstrom um den Anker an der Sollposition zu halten.

Verstärker Der Verstärker hat die Aufgabe, die von den Reglern berechneten Sollströme, an den Spulen des Aktors zu stellen. Dabei können die Verstärker entweder spannungsgesteuert oder stromgeregelt arbeiten.

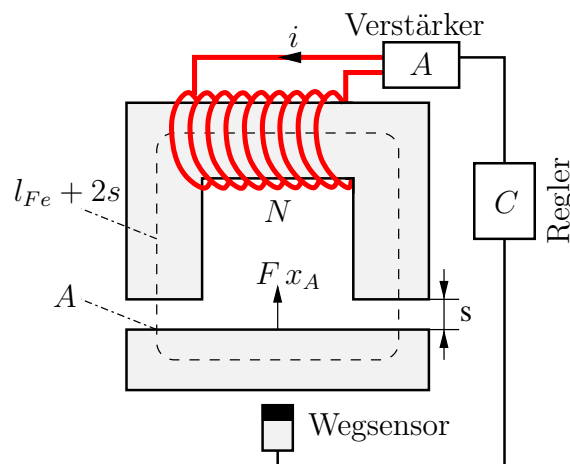


Abbildung 2.1: Aufbau eines Magnetlagers

Zur Vorgehensweise bei der Auslegung und konstruktiven Gestaltung von elektromagnetischen Lagerungen gibt es ausführliche Hinweise in [5], [33], [49] und [51].

2.2 Wirkprinzip des elektromagnetischen Aktors

Das Magnetlager in Abbildung 2.1 arbeitet nach dem elektromagnetischen Prinzip. Hierbei entsteht die Anziehungskraft an den Grenzflächen von Materialien mit unterschiedlicher Permeabilität (Reluktanzkraft). Die Wirkrichtung der Kraft weist hin zu kleineren Werten der Permeabilität μ . Für die in dieser Arbeit benutzte Regelung ist die Abhängigkeit der magnetischen Kraft von den Größen Spulenstrom, Luftspalt und Geometrie (Polschuhfläche) wichtig. Daher wird im Folgenden diese Beziehung näher betrachtet.

Zur Berechnung der Kraft wird die Feldenergie herangezogen, wobei in diesem Fall die gespeicherte Energie im Luftspalt betrachtet wird. Nach [37] ist die Energie im Luftspalt definiert als

$$W_l = \frac{1}{2} B_l H_l V_l. \quad (2.1)$$

Das Volumen des Luftspaltes kann durch

$$V_l = 2 s A_l \quad (2.2)$$

ausgedrückt werden. Die Größen Flussdichte B und Feldstärke H sind über die magnetische Feldkonstante $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{Vs/Am}$ und die relative Permeabilität $\mu_r(H)$ verknüpft. Die relative Permeabilität ist abhängig von der Feldstärke H . Als Vereinfachung in den folgenden Berechnungen wird μ_r als konstant angenommen.

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (2.3)$$

Ein Einsetzen der Gleichungen (2.2) und (2.3) für Luft ($\mu_{rl} \approx 1$) in (2.1) führt auf die Gleichung (2.4), die die Energie im Luftspalt in Abhängigkeit von der Flussdichte beschreibt.

$$W_l = \frac{B_l^2 A_l s}{\mu_0} \quad (2.4)$$

Findet eine Verschiebung des Ankers um δs statt, wird dem System mechanische Energie zugeführt. Diese zugeführte Energie wird im magnetischen Feld des Luftspalts gespeichert. Daraus entsteht die wirkende Kraft am Anker. Für diese Betrachtungsweise muss angenommen werden, dass sich für kleine Verschiebungen δs der magnetische Fluss nicht ändert und dem System über die Spule keine elektrische Energie zugeführt wird. Die Berechnung der elektromagnetischen Kraft F_m auf den Anker kann dann über das Prinzip der virtuellen Verrückungen (siehe z.B. [14]) erfolgen.

$$F_m = \frac{dW_l}{ds} = \frac{B_l^2 A_l}{\mu_0} \quad (2.5)$$

Aus Gleichung (2.5) wird ersichtlich, dass die magnetische Kraft von dem Quadrat der Flussdichte abhängt. Über das Durchflutungsgesetz kann ein Zusammenhang zwischen

der magnetischen Kraft F_m , dem Strom i und dem Luftspalt s hergestellt werden. Voraussetzung dafür ist, dass entlang der Linie $l_{Fe} + 2s$ in Abbildung 2.1, dass magnetische Feld homogen über der Fläche verteilt ist und keine Streuflüsse außerhalb des Eisenkerns und des Luftspalts vorhanden sind.

Das Durchflutungsgesetz für ein homogenes Magnetfeld lautet

$$\Theta = \oint H ds = N i \quad (2.6)$$

$$H_{Fe} l_{Fe} + 2 H_l s = N i \quad (2.7)$$

Mit der Beziehung aus (2.3) ergibt sich für den Eisenkern und den Luftspalt die Flussdichte zu

$$B_l = \mu_0 \mu_{rl} H_l \quad (2.8)$$

$$B_{Fe} = \mu_0 \mu_{rFe} H_{Fe}. \quad (2.9)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen 2.8 und 2.9 in Gleichung (2.7) erhält man

$$\frac{B_{Fe}}{\mu_{rFe} \mu_0} l_{Fe} + 2 \frac{B_l}{\mu_0 \mu_{rl}} s = N i. \quad (2.10)$$

Vernachlässigt man die Streuungen kann davon ausgegangen werden, dass der magnetische Fluss ϕ im gesamten magnetischen Kreis (Eisenkern und Luftspalt) gleich ist.

$$\phi = B_l A_l = B_{Fe} A_{Fe} = B A \quad (2.11)$$

Wird die Beziehung aus 2.11 in Gleichung 2.10 eingesetzt, folgt daraus

$$B = \frac{N i \mu_0 \mu_{rl}}{\frac{l_{Fe}}{\mu_{rFe}} + 2 s} \quad (2.12)$$

Der Quotient l_{Fe}/μ_{rFe} in Gleichung 2.12 stellt den magnetischen Widerstand des Eisens dar. Zur Vereinfachung der Gleichung kann ausgenutzt werden, dass μ_{rFe} wesentlich größer ist als eins. Der Einfluss des Quotienten bei großem Luftspalt ist klein und kann für diesen Fall vernachlässigt werden. Durch Einsetzen der vereinfachten Gleichung (2.12) in Gleichung (2.5) ergibt sich die magnetische Kraft antiproportional zum Quadrat des

Luftspaltes und proportional zum Quadrat des Stroms.

$$F_m = \frac{N^2 A_l \mu_0}{4} \frac{i^2}{s^2} \quad (2.13)$$

Die Gleichung (2.13) stellt eine Näherung für die Abhängigkeit der Kraft vom Strom und vom Luftspalt dar. Für abschätzende Aussagen, die das grundlegende Verhalten beschreiben, ist die Genauigkeit dieser Näherung ausreichend.

2.3 Eigenschaften des Magnetlagers

Im Folgenden werden die Eigenschaften und das Verhalten eines Magnetlagers beschrieben. Der Fokus dabei, liegt auf der Lagerung freier Massen. Hierfür muss das System aus Aktor und freier Masse durch einen Regler stabilisiert werden.

2.3.1 Linearisierung des Verhaltens

Wie aus Gleichung (2.13) zu erkennen, ist der Zusammenhang zwischen Kraft, Strom und Weg nichtlinear. Um dennoch ein lineares Regelgesetz nutzen zu können, wird das Verhalten um einen Arbeitspunkt linearisiert. Der Arbeitspunkt wird, wie in Abbildung 2.2, durch die Größen F_0, i_0, s_0 festgelegt. Nach der Linearisierung des Verhaltens um diesen Arbeitspunkt, sind für das Regelgesetz nur die Änderungen um diesen von Interesse. Die Änderungen werden durch die Größen F, i, x_A beschrieben. Für die Variable x ist zu beachten, dass diese bei einer Verkleinerung des Luftspaltes positiv und für eine Vergrößerung negativ wird.

Am Arbeitspunkt werden die Steigungen der Kennlinien aus Abbildung 2.2 bestimmt. Im Falle der Beziehung $F_m(i_m, s_0)$ ergibt sich am Arbeitspunkt eine positive Steigung k_i , über die die Änderung der Kraft bei Änderung des Stroms berechnet werden kann. k_i wird nach [47] Kraft-Strom-Faktor genannt. Die Steigung k_s im Arbeitspunkt für die Beziehung $F_m(s, i_0)$ des Elektromagneten kann als eine Steifigkeit betrachtet werden, da die physikalische Dimension dieser Größe (N/m), einer Steifigkeit entspricht. k_s wird nach [47] Kraft-Weg-Faktor genannt. Die negative Steigung von k_s hat Auswirkungen auf die Stabilität, da das System schon bei kleinen Auslenkungen aus dem Arbeitspunkt instabil wird. Mit den aufgeführten Definitionen für die Größen Kraft, Strom, Weg, Steigungen k_i und k_s am Arbeitspunkt, kann die Änderung der Kraft F um den Arbeitspunkt als Funktion von Strom und Auslenkung in linearisierter Form angegeben werden als:

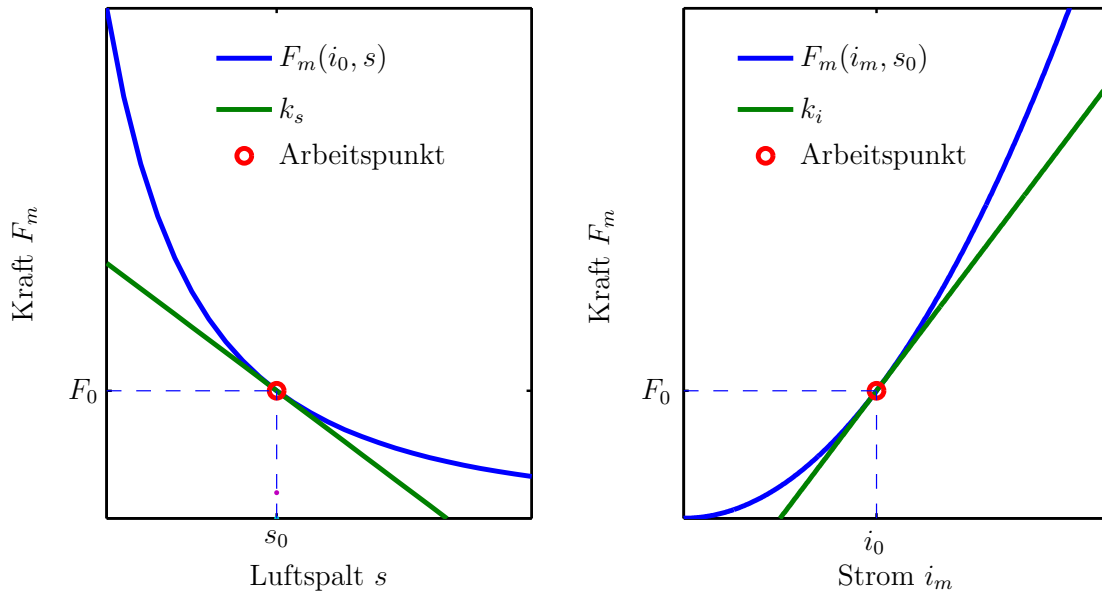


Abbildung 2.2: Kennlinien eines elektromagnetischen Aktors

$$F = k_i i + k_s x_A \quad (2.14)$$

Die negative Charakteristik der Steigung k_s wird durch die Wahl der Richtung der Koordinate bestimmt. Für kleiner werdende Luftspalte nimmt diese zu und somit auch die Kraft. Für größer werdende Luftspalte wird der Wert der Koordinate negativ und verringert somit die wirkende Kraft am Arbeitspunkt.

2.3.2 Standardregelkreis und die Betrachtung der Stabilität

Aufgrund der negativen Steifigkeit k_s ist das Magnetlager als unregelmäßiges System instabil. Daher ist das erste Ziel einer Regelung für ein Magnetlager die Stabilisierung des Systems im Arbeitspunkt. Im folgenden wird die Instabilität des offenen und die Stabilität des geschlossenen Kreises für ein Standardregelkreis eines Magnetlagers untersucht. Dazu wird die Lage der Pole des offenen und geschlossenen Kreises in der komplexen Ebene betrachtet.

In Abbildung 2.3 ist das Blockschaltbild eines Regelkreises für ein Magnetlager dargestellt. Die Strecke besteht aus der ungefederten Masse und dem linearisierten Verhalten des Aktors aus Gleichung (2.14). Das Sensorverhalten wird hier als ideal angenommen.

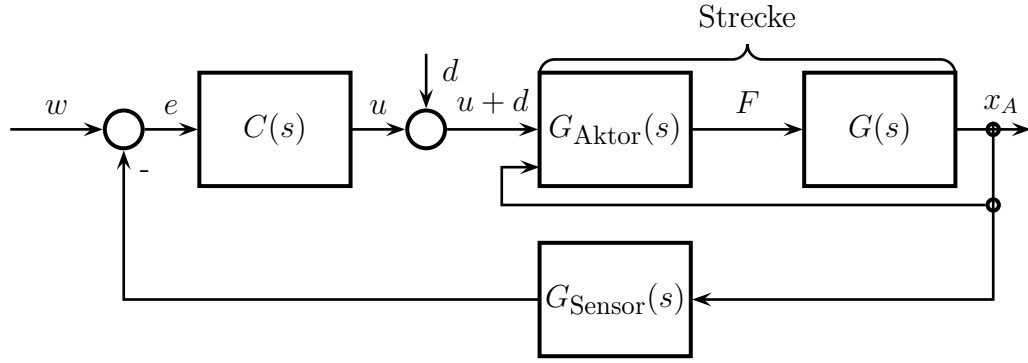


Abbildung 2.3: Standardregelkreis eines Magnetlagers

$$m \ddot{x}_A = F \quad \circ \text{---} \bullet \quad m s^2 X_A(s) = F(s) \quad (2.15)$$

$$F = k_i i + k_s x_A \quad \circ \text{---} \bullet \quad F(s) = k_i I(s) + k_s X_A(s) \quad (2.16)$$

Durch Einsetzen der Gleichung 2.16 in 2.15 ergibt sich die Übertragungsfunktion der Strecke $G(s)$ zu:

$$m s^2 X_A(s) = k_i I(s) + k_s X_A(s) \quad (2.17)$$

$$G(s) = \frac{k_i}{m s^2 - k_s} \quad (2.18)$$

Der Regler $C(s)$ in Abbildung 2.3 hat einen proportionalen und einen differentiellen Anteil. Die Übertragungsfunktion hierfür lautet:

$$i = k_d \dot{e} + k_p e \quad \circ \text{---} \bullet \quad I(s) = (k_d s + k_p) E(s) \quad (2.19)$$

$$C(s) = k_d s + k_p \quad (2.20)$$

Stabilität des offenen Kreises

Für den in Abbildung 2.3 dargestellten Regelkreis ergibt sich die Übertragungsfunktion des offenen Kreises mit den Gleichungen (2.20) und (2.18) zu

$$G_0(s) = G(s) C(s) \quad (2.21)$$

$$G_0(s) = \frac{k_i (k_p + k_d s)}{m s^2 - k_s} \quad (2.22)$$

Zur Beurteilung der Stabilität werden die Pole von $G_0(s)$ aus der Gleichung (2.23) berechnet und deren Lage im Pol-Nullstellendiagramm in Abbildung 2.4 betrachtet.

$$m s^2 - k_s = 0 \quad (2.23)$$

$$s_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{k_s}{m}} \quad (2.24)$$

Die Pole $s_{1,2}$ sind rein reell. Der positive Realteil des Pols S_1 zeigt an, dass das System ohne eine Rückführung der Position x instabil ist.

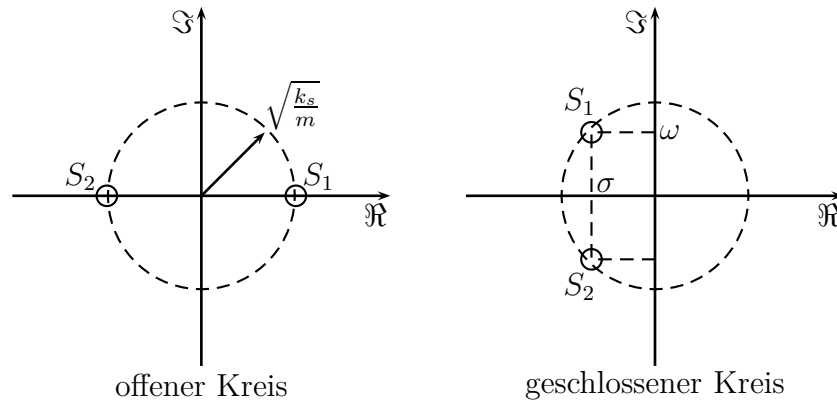


Abbildung 2.4: Pol-Nullstellendiagramme

Stabilität des geschlossenen Kreises

Zur Darstellung der Stabilität des geschlossenen Kreises werden die Pole der Führungsübertragungsfunktion bestimmt und deren Lage in der komplexen Ebene betrachtet. Die Führungsübertragungsfunktion $T(s)$ für den Regelkreis in Abbildung 2.3 lautet:

$$T(s) = \frac{X(s)}{W(s)} = \frac{G(s) C(s)}{1 + G(s) C(s)} \quad (2.25)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen (2.20) und (2.18) in Gleichung (2.25) kommt man zu:

$$T(s) = \frac{k_i k_d s + k_i k_p}{m s^2 + k_i k_d s + k_i k_p - k_s} \quad (2.26)$$

Die Pole der Übertragungsfunktion 2.26 werden durch das charakteristische Polynom 2.27 berechnet.

$$m s^2 + k_i k_d s + k_i k_p - k_s = 0 \quad (2.27)$$

$$s_{1,2} = -\frac{k_i k_d}{2m} \pm \sqrt{\frac{k_i^2 k_d^2}{4m^2} - \frac{k_i k_p - k_s}{m}} \quad (2.28)$$

Wie aus der Gleichung (2.28) zu sehen ist, hängt die Lage der Pole von der Wahl der Parameter k_p und k_d des Reglers und von den Parametern k_i und k_s des Magnetlagers ab. k_p sollte nach [49] in der Größenordnung von k_s liegen, um Instabilitäten zu vermeiden. Wird k_d zu null gesetzt, erhält man theoretisch ein grenzstabiles System, was unter realen Bedingungen meist zu instabilem Verhalten führt. Bei geeigneter Wahl von k_d , was zum einen von k_p , aber auch von der Qualität des Messsystems und von der Dynamik des Aktors abhängt, wird das Systemverhalten stabil. Die Pole $s_{1,2}$ der Gleichung 2.27 liegen dann in der linken Halbebene der komplexen Ebene, so wie in Abbildung 2.4 dargestellt.

2.4 Betrachtung der Dynamik

Wie in Abschnitt 2.2 dargestellt hängt die magnetische Kraft vom Strom in der Spule des Magneten ab. Wird eine Spannung U an der Spule angelegt, folgt der Strom mit einer zeitlichen Verzögerung. Diese hängt von den physikalischen Parametern Induktivität L und Widerstand R der Spule ab.

Nach [34] kann das elektrische Verhalten der Spule mit dem Ersatzschaltbild in Abbildung 2.5 dargestellt werden. Das zeitliche Verhalten der Spule wird durch die Differentialgleichung 2.29 beschrieben.

$$U = R i + L \frac{di}{dt} \quad (2.29)$$

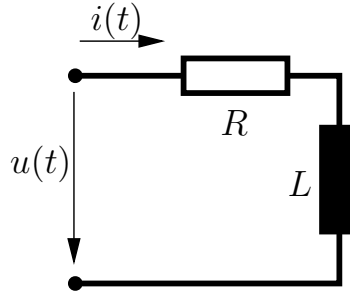


Abbildung 2.5: Ersatzschaltbild des magnetischen Kreises

Aus dieser erhält man durch eine Laplace-Transformation die Übertragungsfunktion 2.30 des magnetischen Kreises.

$$\frac{I(s)}{U(s)} = \frac{1}{L s + R} \quad (2.30)$$

Das Verhalten einer Spule kann somit als ein Verzögerungsglied 1. Ordnung beschrieben werden, wobei die Zeitkonstante $T_s = L/R$ ist. Die Dynamik einer solchen Spule liegt meist unter der geforderten Dynamik des Magnetlagers. Diese kann nach [21] in üblichen Anwendungen in Abhängigkeit von der Bauart und der Dimensionierung in einem Bereich von 100 Hz bis 1000 Hz liegen. Daher wird in vielen Einsatzfällen ein strom geregelter Verstärker eingesetzt, um die Dynamik zu erhöhen. Oft handelt es sich dabei um P oder PI geregelte Systeme. Die Übertragungsfunktion eines solchen Systems, bestehend aus Regler und Spule, wird zu einer Übertragungsfunktion 2. Ordnung.

$$\frac{I(s)}{I_{soll}(s)} = \frac{k_p s + c_i}{L s^2 + (R + k_p)s + c_i} \quad (2.31)$$

Die Dynamik von Magnetlagern kann durch das Entstehen von Wirbelströmen stark negativ beeinflusst werden. Zur Abschätzung und Modellierung dieses Effekts gibt es unterschiedliche Ansätze. In [54] werden die Effekte der Wirbelströme durch ein Verzögerungsglied 1. Ordnung abgebildet. In [17] wird durch eine komplexe Impedanz bestehend aus einer Wechselstrominduktivität und einem Wirbelstromwiderstandes der Effekt abgebildet. Beim Einsatz von Materialien mit niedriger elektrischer Leitfähigkeit, wie in [24] beschrieben, für die vom Magnetfluss durchfluteten Komponenten, ist die Entstehung von Wirbelströmen stark vermindert und kann vernachlässigt werden. Die erreichbare Dynamik eines Magnetlagers wird durch die Leistungsgrenzen der eingesetzten Verstärker bestimmt. Im Wesentlichen haben die zwei Faktoren

- Begrenzung des Stroms und
- Begrenzung der Stromänderung

hierauf einen Einfluss. Nähere Informationen hierzu sind in [30] zu finden.

2.5 Fazit

Die Zusammenhänge der Größen Kraft, Strom und Luftspalt für eine elektromagnetische Lagerung hängen nichtlinear voneinander ab. Für den Betrieb mit einem linearen Regler muss das Systemverhalten an einem Arbeitspunkt linearisiert werden. Der Regler wird benötigt, da das ungeregelte System aufgrund der negativen Steigung der Kennlinie Kraft über Luftspalt instabiles Verhalten aufweist. Deshalb ist eine Regelung für die stabile Lagerung der Masse notwendig. Zur Erhöhung der Dynamik des Aktors und damit auch zur Erhöhung der Dynamik des gesamten Systems ist ein strom geregelter Verstärker sinnvoll. Ansonsten wären aufgrund der sehr geringen Dynamik des Aktors nur geringe Dämpfungswerte möglich, was auch die erreichbare Steifigkeit stark einschränken würde.

3 Der Prüfstand

Dieses Kapitel beschreibt den Aufbau des während dieser Arbeit entstandenen Prüfstand. Dafür wird auf die Teile und Baugruppen eingegangen, aus denen der Prüfstand besteht und die für die experimentellen Untersuchungen benutzt wurden.

Das Transportsystem dient dazu einen ungefesselten Körper berührungslos zu führen und eine translatorische Transportbewegung entlang einer geraden Bahn zuzulassen. Der Prüfstand wurde gebaut, um Ergebnisse aus Simulationen und analytischen Beschreibungen des Verhaltens des Systems zu validieren. Einen Überblick über den gesamten Aufbau des Prüfstandes gibt das Foto in Abbildung 3.1. Das Transportsystem auf der Abbildung besteht aus den folgenden Komponenten:

- Mechanischer Grundaufbau
- Berührungslos gelagerter Körper mit Ankern
- Elektromagnetische Aktoren und Leistungsverstärker
- Sensorik
- Echtzeitregelsystem und Messdatenerfassung

Der berührungslos gelagerte Körper wird im weiteren als Platte bezeichnet. Die Koordinate für die translatorische Bewegung der berührungslos gelagerten Platte wird x Richtung oder Transportrichtung genannt. Für die translatorische Bewegung der Platte in x Richtung steht am Prüfstand kein eigenständiger Antrieb zur Verfügung. In einem realen System wird dieser Freiheitsgrad durch einen Linearmotor angetrieben. Wie dies in einem Prototypen umgesetzt werden kann, ist in [23] beschrieben. Für den linearen Antrieb wird in dieser Arbeit ein Seilzug verwendet, der manuell betätigt wird.

3.1 Mechanischer Aufbau

Im Folgenden wird der mechanische Aufbau des Systems beschrieben. Dazu gehören die mechanische Grundstruktur zur Befestigung der Führungen und die Platte mit dem geblechten Ankern. Zudem wird auf die strukturdynamischen Eigenschaften der Platte eingegangen, da diese für die zu realisierende Regelung wichtig sind.

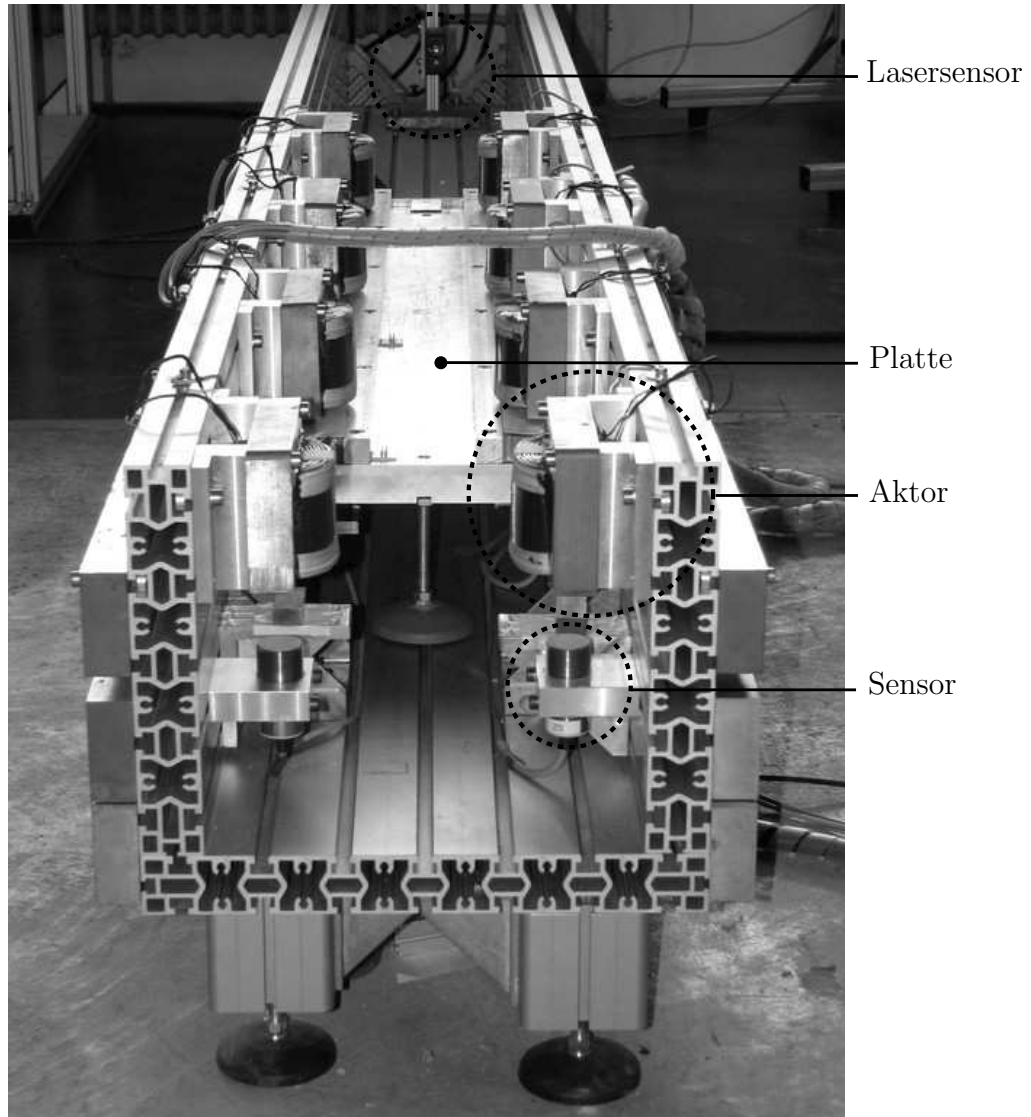


Abbildung 3.1: Foto des Prüfstandes

3.1.1 Grundstruktur des Aufbaus

Das mechanische Grundgerüst besteht aus drei miteinander verschraubten Aluminiumstrangpressprofilen der Firma Isel. Diese bilden den Boden und die Seitenwände. Sie dienen dazu die Aktoren und Sensoren entlang der Transportbahn zu befestigen und die Lagerkräfte aufzunehmen. In einem realen Transportsystem für Vakuumanwendungen sind zwei Führungen paarweise in einem Gehäuse untergebracht, das den Anforderungen an das Ausgasverhalten unter Vakuumbedingungen gerecht wird. Diese Gehäuse enthalten die gesamte Elektronik die benötigt wird, um zwei Führungen in Betrieb zu nehmen. Der genaue Aufbau solcher kompakten Magnetlager ist in der Arbeit [23] beschrieben. Um möglichst nahe an einem realen System zu bleiben, werden an der linken und rechten Seitenwand des Grundgerüsts die Aktoren paarweise verschraubt. Auf jedes Aktorpaar, folgt in einem gleich bleibenden Abstand entlang der Seitenwände, dass nächste Paar Aktoren. Dieser Aufbau ist in der Abbildung 3.2 dargestellt. Erklärungen zu der Funktionsweise des Transportablaufs und der Abstände der Aktoren zueinander sind in Abschnitt 5.1.1 zu finden.

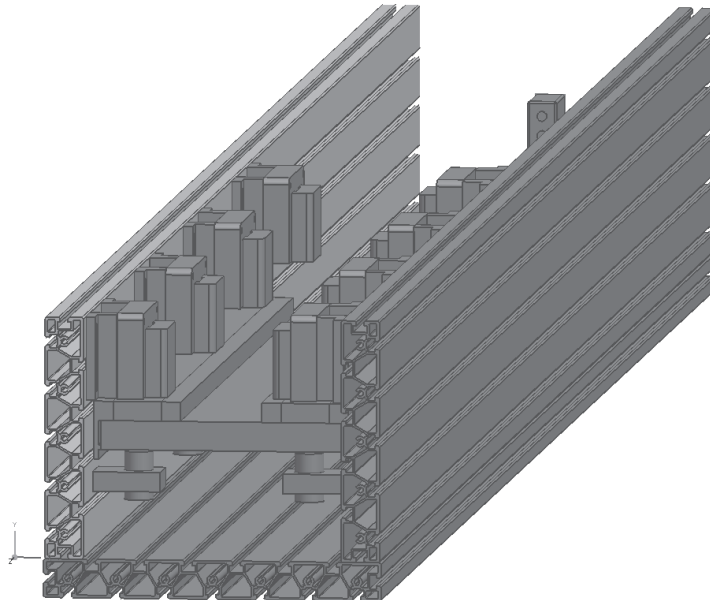


Abbildung 3.2: CAD Modell des Prüfstandes

Unterhalb der Aktoren befinden sich die induktiven Sensoren zur Messung der Positionen der Platte in z Richtung. Zwischen Aktoren und Sensoren ist der Abstand so groß, dass die Platte mit einem Luftspalt von null bis fünf Millimeter berührungslos hindurch schweben kann. Ein Aktor und der dazugehörige Sensor bilden eine elektromagnetische Führung. Zur Messung der Position der Platte in x Richtung befindet sich am hinteren Ende der Bahn ein Lasersensor. Sind die Führungen abgeschaltet, ruht die Platte auf Fanglagern,

die unterhalb der Führungen angebracht sind. Der Luftspalt zu den Aktoren beträgt in diesem Fall fünf Millimeter.

3.1.2 Platte mit Ankern

Die Platte ist ein Quader aus Aluminium. Sie stellt den zu transportierenden Körper dar, der durch die an ihr angreifenden elektromagnetischen Aktoren in der Schwebe gehalten wird. Da die Permeabilität des Aluminiums sehr niedrig ist, kann über das Aluminium kein Rückschluss des elektromagnetischen Feldes stattfinden. Aus diesem Grund sind auf der Platte Anker aus Elektroblech angebracht, wie in Abbildung 3.3 dargestellt. Die Anker sind geblecht ausgeführt, um das Entstehen von Wirbelströmen zu vermeiden. Zur Befestigung können die Anker nicht mit der Platte verschraubt werden, da dies den Querschnitt des Materials verringern würde und lokal zu Sättigungseffekten beim Schweben im magnetischen Feld führen kann. Diese würde die maximal erreichbare Magnetkraft begrenzen, wie dies in [30] beschrieben ist. Daher werden die Bleche der Anker zwischen einem Spannhebel und einem Gegenhalter, die mit der Platte verschraubt sind, verspannt. Aufgrund des magnetischen Flusses sind diese Bauteile aus Aluminium gefertigt.

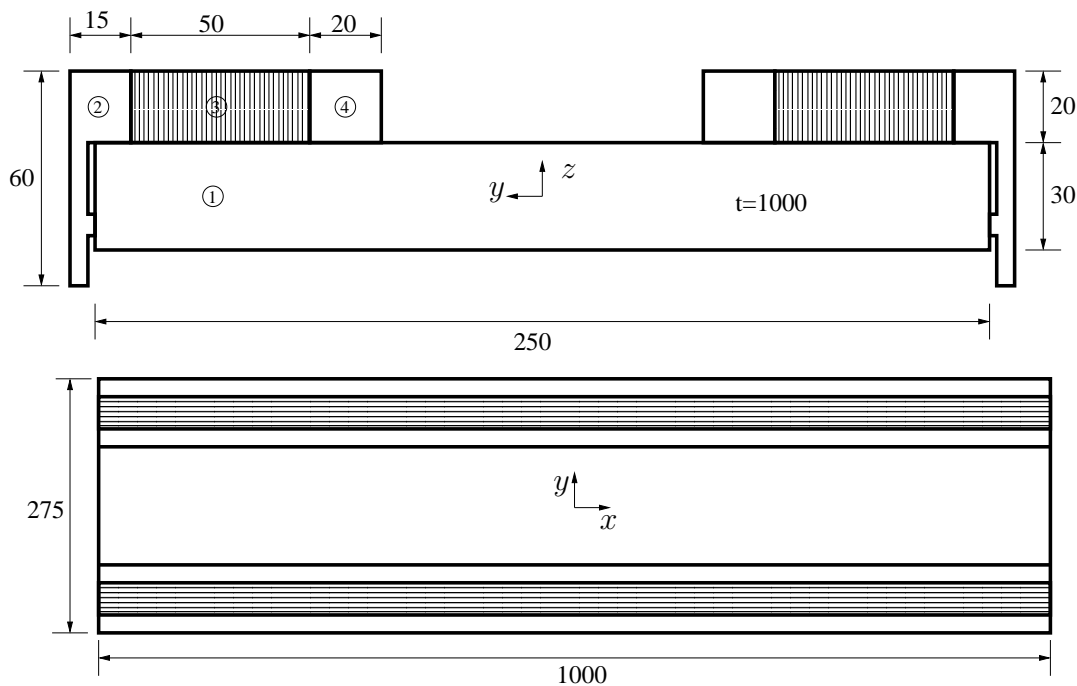


Abbildung 3.3: Skizze der Platte mit geblechten Ankern

Die Platte ist ein freier Körper und hat drei translatorische und drei rotatorische Freiheitsgrade. In Abbildung 3.3 sind die Richtungen der translatorischen Freiheitsgrade

Tabelle 3.1: Bauteile der Platte

Teil	Nummer
massive Aluminiumplatte 30x250x1000	1
Spannhebel	2
geblechte Anker	3
Gegenhalter	4

x, y, z , und die drei rotatorischen Freiheitsgrade φ als Drehung um x , ρ als Drehung um y und β als Drehung um z festgelegt. Mittels der in Abbildung 3.1 dargestellten elektromagnetischen Führungen lassen sich von den sechs genannten Freiheitsgraden die drei Freiheitsgrade φ, ρ und z , welche für die Regelung des Transportvorgangs notwendig sind, direkt beeinflussen. Die beiden Freiheitsgrade y und β sind nicht direkt durch die Aktoren beeinflussbar. In einem realen Transportsystem können Störkräfte durch Produktionsprozesse auftreten, die durch weitere in die y Richtung wirkende Aktoren kompensiert werden müssen. Am Prüfstand ist dies nicht der Fall. Hier soll die Platte in der vorgegeben Bahn gehalten werden. Wie dies am Prüfstand geschieht, ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Die Blechung der Anker ist breiter ausgelegt als die Blechung der Aktoren. Dadurch entstehen Kräfte in die y Richtung, die ein Gleichgewicht bilden und dabei die Platte in y Richtung positionieren. Da dies an allen im Eingriff befindlichen Aktoren gleichzeitig geschieht, wird auch die Drehung um die z Achse unterbunden.

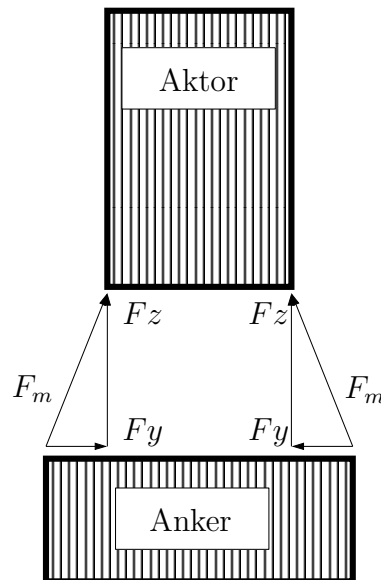


Abbildung 3.4: Wirkung der Seitenführungskräfte

Trotz der daraus resultierenden niedrigen Steifigkeit und der geringen Dämpfung ist dies für den Betrieb des Prüfstands ausreichend. In [13] und [42] wurde diese Art der seitlichen Stabilisierung mit Erfolg angewandt.

3.1.3 Strukturdynamische Eigenschaften der Platte

Die in Abschnitt 3.1.2 beschriebene Platte wird für die Darstellungen der Positionen und Bewegungen als starrer Körper betrachtet. Für das in Kapitel 4 beschriebene Modell ist diese Annahme ausreichend. In der Realität ist die Platte aber ein flexibler Körper mit strukturdynamischen Eigenschaften. Für die Regelung der Lage der Platte werden die Strukturschwingungen nicht betrachtet, da diese über die verwendeten Aktoren nicht aktiv beeinflusst werden können. Ein Grund ist die zu niedrige Dynamik der elektromagnetischen Aktoren und der Verstärker. Allerdings können durch äußere Störungen, wie zum Beispiel Rauschen der Sensorsignale und Rückkopplung über die geschlossenen dezentralen Regelkreise, die Eigenmoden angeregt und das System durch größer werdende Amplituden destabilisiert werden. Daher müssen für die Untersuchungen am Prüfstand die strukturdynamischen Eigenschaften der flexiblen Platte ermittelt und Maßnahmen getroffen werden, um die Stabilität des Systems zu gewährleisten.

Die Platte besteht aus unterschiedlichen Werkstoffen und besitzt eine große Zahl an Fügestellen, z. B. an den Blechpaketen. Dies macht eine genaue Ermittlung der Eigenwerte und Eigenmoden durch ein FE-Modell schwierig. Daher erfolgt die Ermittlung der Eigenwerte und Eigenmoden mittels einer experimentellen Modalanalyse. Die Auswertung der Modalanalyse ergibt, dass die ersten 3 Moden der Platte bei 215 Hz, 227 Hz und 345 Hz liegen. Die zugehörigen Eigenformen sind in den Abbildungen 3.5, 3.6 und 3.7 dargestellt.

Die Eigenform der ersten Mode bei 215 Hz ist die erste Biegemode. Bei einer Frequenz von 227 Hz entsteht aufgrund der seitlich angebrachten Massen der Anker eine Mode, die die Platte tordiert. Die dritte Mode bei 345 Hz ist eine Kombination einer tordierenden Eigenform und der zweiten Biegeeigenform.

Aufgrund der durchgeführten Modalanalyse sind die Eigenwerte, die beim Betrieb des Prüfstandes beachtet werden müssen, bekannt. Um die Auswirkungen der Schwingungen auf die Stabilität des Systems zu minimieren bieten sich z.B. Filter an, die die Frequenzen der Strukturschwingungen aus den Messsignalen filtern. Wie dies in diesem Fall realisiert ist, wird in Abschnitt 3.4.1 beschrieben.

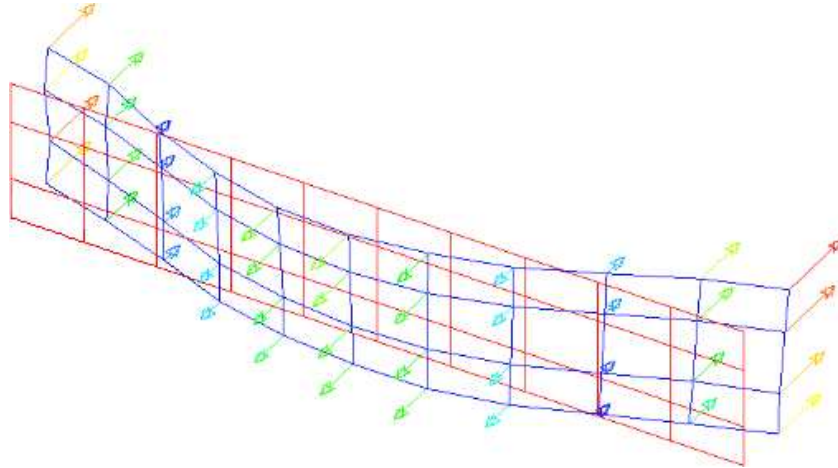


Abbildung 3.5: Starrkörpermode bei 215 Hz

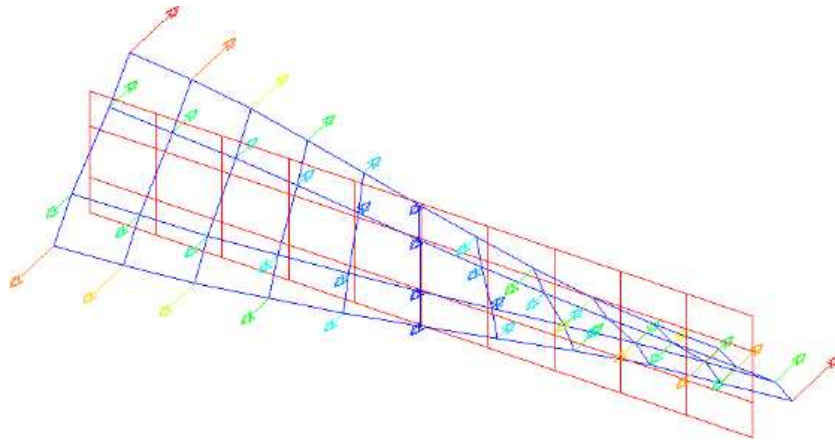


Abbildung 3.6: Starrkörpermode bei 227 Hz

3.2 Elektromagnetische Führungen

Für die Funktion der Lagerung der Platte stehen am Prüfstand acht Führungen zur Verfügung. Jede einzelne besteht aus einem Elektromagneten, einem induktiven Wegsensor und einem Leistungsverstärker. Das Verhalten des Elektromagneten und das des Leistungsverstärkers bildet nach [48] das Verhalten des elektromagnetischen Aktors.

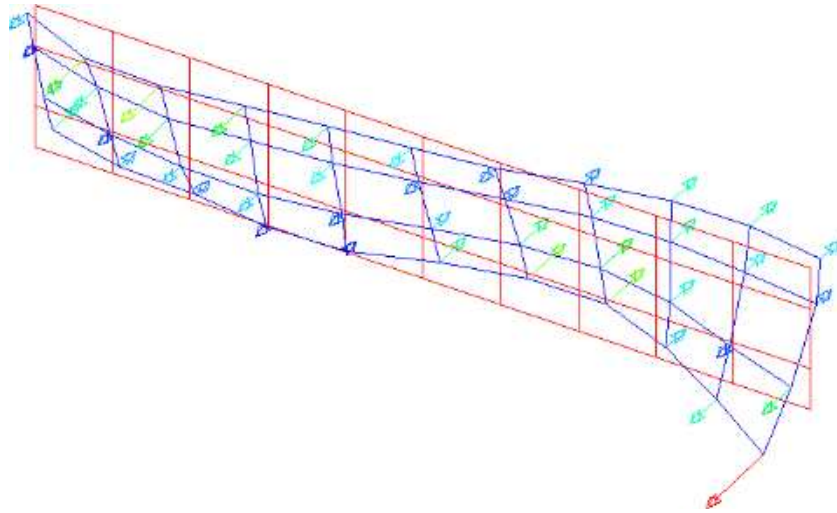


Abbildung 3.7: Starrkörpermode bei 345 Hz

3.2.1 Elektromagnete

Die Elektromagnete bestehen aus einem geblechten Eisenkern in *EI130* Bauform, wie in Abbildung 3.8 dargestellt und einer Spule mit 850 Windungen einem Widerstand von drei Ohm und einer Induktivität von zehn mH. Die Polschuhfläche des mittleren Schuhs beträgt 700 mm^2 . Die Auslegung und Berechnung der elektromagnetischen Aktoren wird in der Arbeit [23] beschrieben.

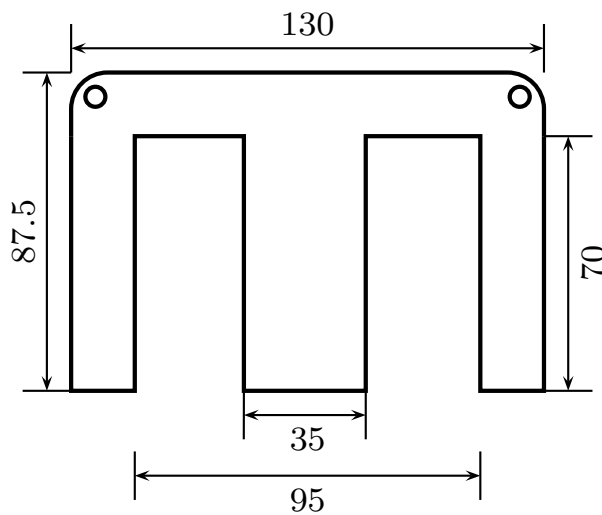


Abbildung 3.8: Blechschnitt EI 130

3.2.2 Verstärker

Als Leistungsverstärker steht das Modell *MBE8-50* der Firma MECOS TRAXLER AG zur Verfügung. Dieses Gerät besitzt zehn einzelne Endstufen, von denen für diesen Aufbau die ersten acht genutzt werden. Die Endstufen können sowohl spannungsgesteuert als auch stromgeregelt betrieben werden. Für diese Arbeit wird ausschließlich der stromgeregelte Betrieb genutzt. Zusätzlich bietet das Gerät die Möglichkeit über integrierte Stromsensoren den momentan fließenden Strom in den Spulen zu messen. Die technischen Eckdaten des Verstärkers sind in Tabelle 3.2 angegeben.

Tabelle 3.2: Daten des Leistungsverstärkers MBE8-50

max. Ausgangsspannung	+48 Volt
min. Ausgangsspannung	−48 Volt
max. Ausgangsstrom	8 Ampere
Modulationsfrequenz	78,125 kHz
Zwischenkreisspannung	50 Volt

3.3 Sensorik für die Positionsbestimmung der Platte

Jede Magnetführung verfügt über einen induktiven Positionssensor. Damit ist es möglich die Position der Platte in z Richtung an jeder Führung zu bestimmen. Außerdem können aus den Positionsdaten aller Sensoren die Koordinaten des Schwerpunktes bezüglich der Richtungen φ, ρ, z berechnet werden. Dies ist für die Auswertung relevant, da die Lage des Schwerpunktes als Bezugsgröße für Vergleiche herangezogen wird und für das im Weiteren vorgestellte Regelungskonzept. Für die Bestimmung der Lage der Platte in Transportrichtung wird ein gesonderter Laserpositionssensor verwendet.

3.3.1 Induktive Wegsensoren für die z Position der Platte

Die induktiven Sensoren der Firma Welotec mit der Bezeichnung *iwpb60 B100 AA k* werden am Prüfstand eingesetzt, um die z Positionen der Platte an den einzelnen Führungen zu messen. Die Sensoren besitzen einen angegebenen Messbereich von fünf Millimeter bei einem Messabstand von fünf bis zehn Millimeter. Die Ausgangsspannung des Sensorsignals liegt dabei zwischen einem Volt und neun Volt. Die Herstellerangaben beziehen sich dabei auf Stahl als Material für die Targetfläche. Die hier verwendete Targetfläche besteht aus Aluminium, was die Kennlinie verändert. Aus diesem Grund müssen diese

neu vermessen werden. Als Referenzmesssystem wird dazu ein Laserwegmesssystem der Firma Keyence der Baureihe *LK-G* verwendet. In Abbildung 3.9 sind exemplarisch die Messdaten für einen Sensor dargestellt. Die Kennlinie entsteht durch eine lineare Interpolation zwischen den einzelnen Stützpunkten der Messdaten. Abweichend von den Herstellerangaben ist auffällig, dass sich der Verlauf der Kennlinie verschiebt und eine nicht konstante Steigung besitzt. Der Messbereich liegt, mit Aluminium als Targetfläche, zwischen einem und fünf Millimetern. Dies ergibt eine erreichbare Auflösung von 0.5 mm/Volt . Die gemessenen Referenzkennlinien der einzelnen Sensoren werden am Prüfstand als Wertetabellen hinterlegt, um aus den gemessenen Spannungen die tatsächlichen Abstände bestimmen zu können.

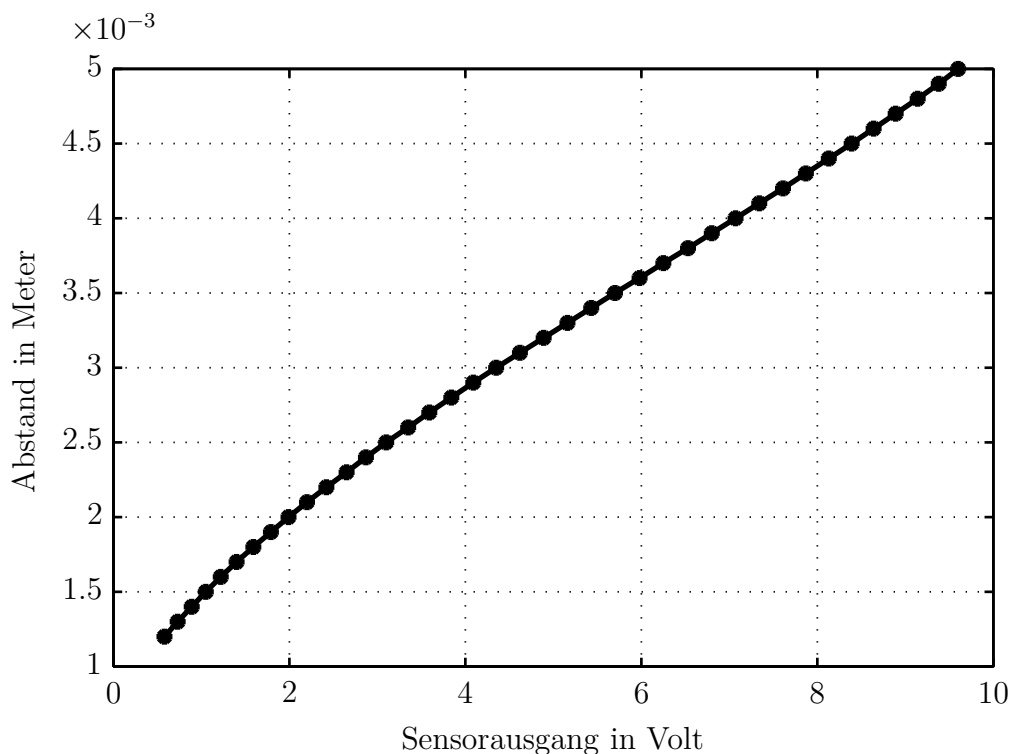


Abbildung 3.9: Sensorkennlinie Welotec *iwpb60 B100 AA k*

3.3.2 Lasersensor für die x Position der Platte

Die Messung der x Position erfolgt berührungslos, damit keine Störkräfte durch das Messsystem an der Platte entstehen. Weiterhin wird ein Messbereich von ca. einem Metern durch den Lasersensor abgedeckt. Um diese Bedingungen zu erfüllen, wird ein Laserwegsensor der Firma Banner Engineering Corp. mit der Bezeichnung *LT3PU* eingesetzt. Dieser besitzt einen maximalen Messbereich von 0.3 Metern bis 3.0 Metern.

Der Messbereich ist variabel zwischen dem minimalen und maximalen Wert einstellbar. Bei einem Wert von einem Meter ergibt sich eine Auflösung von 0.1 Meter/Volt . Diese Auflösung ist ausreichend, um für das Regelungskonzept in Kapitel 5 die Position des Schwerpunktes bestimmen zu können.

3.4 Echtzeitsystem zur Regelung und Messdatenerfassung

Auf dem Echtzeitsystem werden die Regler zur Regelung der Lage der Platte ausgeführt. Dazu müssen durch das System alle analogen Sensorsignale der neun Positionssensoren erfasst und in digitale Größen gewandelt werden. Zusätzlich werden die digitalen Signale, bevor diese dem Regler zugeführt werden durch Filter konditioniert. Nach der Berechnung der Stellgrößen durch die Regelalgorithmen werden diese in analoge Stellgrößen für die acht elektromagnetischen Führungen gewandelt. Die Abarbeitung dieser Kette an Aufgaben erfolgt in Echtzeit, mit einer Abtastzeit von 0.00025 Sekunden. Als Hardware steht eine Singleboardlösung mit der Bezeichnung *DS1104* der Firma dSPACE zur Verfügung. Auf diesem Board sind alle notwendigen Komponenten, wie der digitale Signalprozessor (DSP), die Analog/Digital-Wandler und die Digital/Analog-Wandler untergebracht. Das System besitzt 16 Ein- und 8 Ausgänge, was der limitierende Faktor bei der Anzahl an aktiven Führungen ist. Alle Implementierungen der Software für die Messdatenverarbeitung und die Regelalgorithmen sind als Simulink-Blockdiagramme programmiert und werden mittels eines Compilers für die Ausführung auf dem DSP in Maschinencode übersetzt. Als Benutzerschnittstelle zur Speicherung von Messdaten und Parametrisierung der Regelalgorithmen wird die Software ControlDesk der Firma dSPACE genutzt.

3.4.1 Aufbereitung der Sensorsignale

Die Spektren der gemessenen Signale der Positionssensoren setzen sich aus unterschiedlichen Signalanteilen zusammen. Dies sind die Bewegung der Platte als Starrkörper, Messrauschen, Strukturschwingungen der Platte und Frequenzen aus den Aliasingeffekten der Abtastung der Sensorsignale. Für die Positionsregelung der Platte stellt deren Starrkörperbewegung den Nutzanteil des Sensorsignals dar. Alle anderen genannten Anteile des Spektrums werden für die Regelung nicht benötigt und können die Stabilität der Regelkreise negativ beeinflussen. Die Vorgehensweise, um das Nutzsignal von den anderen Signalanteilen zu trennen wird im Folgenden beschrieben.

Aliasingfilter

Wie in [19] beschrieben entstehen durch die Abtastung von analogen Signalen, deren Frequenzen oberhalb der Nyquistfrequenz des Echtzeitsystems liegen niederfrequente Störsignalanteile. Diese besitzen die gleiche Amplitude wie die hochfrequenten Ausgangssignale. Dieses Verhalten wird Aliasingeffekt genannt. Nach der Abtastung des Signals kann nicht mehr zwischen den durch den Aliasingeffekt entstanden und wirklich vorhandenen Frequenzen unterschieden werden. Daher können diese Störanteile nicht durch digitale Filter unterdrückt werden. Zur Unterdrückung der Signalanteile muss ein analoger Filter mit einer Eckfrequenz von höchstens der Nyquistfrequenz des Echtzeitsystems vor dem Abtastglied platziert werden. Am Prüfstand werden dazu passive Tiefpässe erster Ordnung eingesetzt. Die Nyquistfrequenz des Echtzeitsystems liegt bei 2000 Hz. Die Tiefpassfilter sind so ausgelegt, dass sie eine Eckfrequenz von 1500 Hz aufweisen, dadurch werden die Frequenzen oberhalb der Nyquistfrequenz mit mehr als drei dB unterdrückt.

Unterdrückung von Rauschen und Strukturschwingungen im Messsignal

Das Messsignal ist mit breitbandigem Rauschen und Signalanteilen aus den Strukturschwingungen überlagert. Das breitbandige Rauschen wird durch die geschlossenen Regelkreise zurückgeführt und von den Reglern verstärkt. Dies regt die Moden der Struktur aus Abschnitt 3.1.3 an und kann zu großen Amplituden der Stellgrößen für die Aktoren führen. Durch die Nichtlinearität des Aktorverhaltens kann dies das System destabilisieren. Ebenso können die Moden der Struktur durch äußere Störungen angeregt werden, was ebenfalls zu großen Amplituden der Stellgrößen führt. Als Lösung bieten sich digitale Filter an, die die unerwünschten Anteile vom Nutzsignal trennen. Für den hier vorliegenden Fall, mit tiefen Eigenfrequenzen der Struktur und breitbandigem Rauschen, wird in [43] vorgeschlagen, schmalbandige Notchfilter zur Unterdrückung der tiefen Eigenfrequenzen und einen Tiefpassfilter zur Dämpfung des Rauschens, dessen Eckfrequenz oberhalb der höchsten zu dämpfenden Eigenfrequenz der Struktur liegt, einzusetzen. Zur Implementierung der Filter am Prüfstand, wird für den Tiefpassfilter Gleichung 3.1 verwendet. Für den Notchfilter wird die Gleichung 3.2 nach [26] genutzt.

$$H(s) = \frac{1}{T_f s + 1} \quad (3.1)$$

$$P(s) = \frac{s^2 + 2 Q D \omega_x s + \omega_x^2}{s^2 + 2 D \omega_x s + \omega_x^2} \quad (3.2)$$

Am Prüfstand werden alle Positionssignale der induktiven Sensoren durch eine Filterkombination aus zwei Notch- und einem Tiefpassfilter gefiltert. In Abbildung 3.10 ist

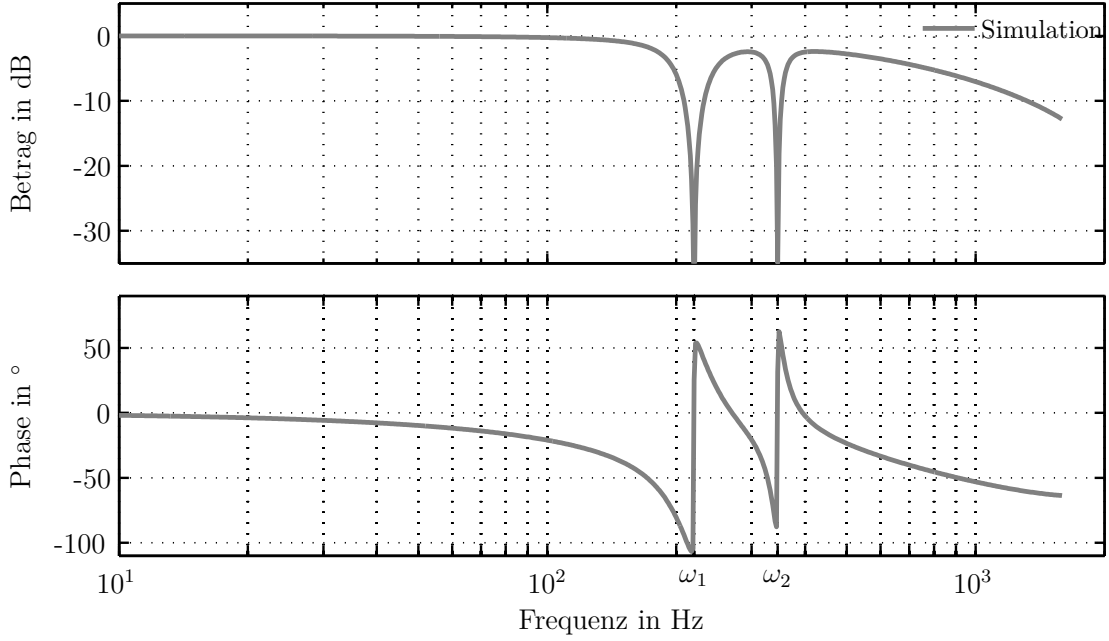


Abbildung 3.10: Amplituden- und Phasengang des eingesetzten Filters

der Amplitudengang eines solchen Filters dargestellt. Der erste Notchfilter dämpft die ersten beiden eng zusammen liegenden Moden und der Zweite die dritte Mode. Für die Notchfilter fällt in dem Bereich der Kennkreisfrequenzen ω_1 und ω_2 der Amplitudengang bis auf die minimale Verstärkung Q ab. Oberhalb und unterhalb der Frequenzen ω_1 und ω_2 geht das Übertragungsverhalten gegen eins. Durch den Parameter D wird die Einschwingdauer und der Sperrbereich der Notchfilter vorgegeben. Die Einschwingdauer T_n der Filter hängt durch die Beziehung

$$T_n = \frac{1}{D \omega_{1,2}} \quad (3.3)$$

von D und $\omega_{1,2}$ ab. Die Kerbbreite $\Delta\omega_{1,2}$, an der der Abfall im Amplitudengang -3 dB beträgt, wird ausgedrückt durch

$$\Delta\omega_{1,2} = 2 D \omega_{1,2}. \quad (3.4)$$

Durch diesen Zusammenhang ergibt sich eine schmale Kerböffnungsbreite für kleine Werte von D , aber eine große Einschwingdauer.

4 Modellbildung des Transportsystems

Dieses Kapitel beschreibt die Modellbildung des in Kapitel 3 beschriebenen Transportsystems. Das Ziel der Modellerstellung ist es, ein Werkzeug zur Verfügung zu haben, mit dem sich ein besseres Verständnis über die physikalischen Zusammenhänge am System gewinnen lässt und Einflussgrößen, von denen das Verhalten des Gesamtsystems maßgeblich abhängt, identifizieren zu können. Zudem bietet die Simulation des Modells die Möglichkeit auftretende Effekte zu isolieren, um deren Ursachen zu bestimmen. Weiterhin ist die Möglichkeit gegeben, ohne großen Aufwand Zustände zu simulieren, für die an dem realen Prüfstand langwierige Umbauarbeiten durchgeführt werden müssen. In Abbildung 4.1 ist das gesamte mechatronische System als eine Kombination aus einer Funktionsskizze des mechanischen Systems, mit den Positionen der Aktoren und Sensoren und einem Signalfussplan für die Mess- und Stellgrößen, dargestellt. Zur Modellbildung werden einzelne Modelle der Komponenten des mechatronischen Gesamtsystems,

- wie die mechanische Strecke,
- die Regler,
- die Sensoren und
- die elektromagnetischen Aktoren der Führungen

erstellt und diese zu einem Gesamtmodell kombiniert. Zur Erstellung der Modelle der einzelnen Komponenten werden unterschiedliche Verfahren der Modellbildung angewandt.

Grundsätzlich wird zwischen der theoretischen und der experimentellen Modellbildung unterschieden [16]. Bei der theoretischen Modellbildung wird aufgrund von bekannten physikalischen Zusammenhängen des Systems eine mathematische Beschreibung erstellt, die das Verhalten des realen Systems nachbildet. Der Vorteil des theoretischen Ansatzes gegenüber dem Experimentellen ist, dass zum Zeitpunkt der Modellbildung kein reales System existieren muss, um eine Systembeschreibung zu erstellen. Bei der experimentellen Methode muss ein System vorhanden sein, da das experimentelle Modell durch Identifikation aus Messdaten des realen Systems entsteht. Im Folgenden wird sowohl die experimentelle als auch die theoretische Methode genutzt, um ein Modell des mechatronischen Gesamtsystems zu erstellen.

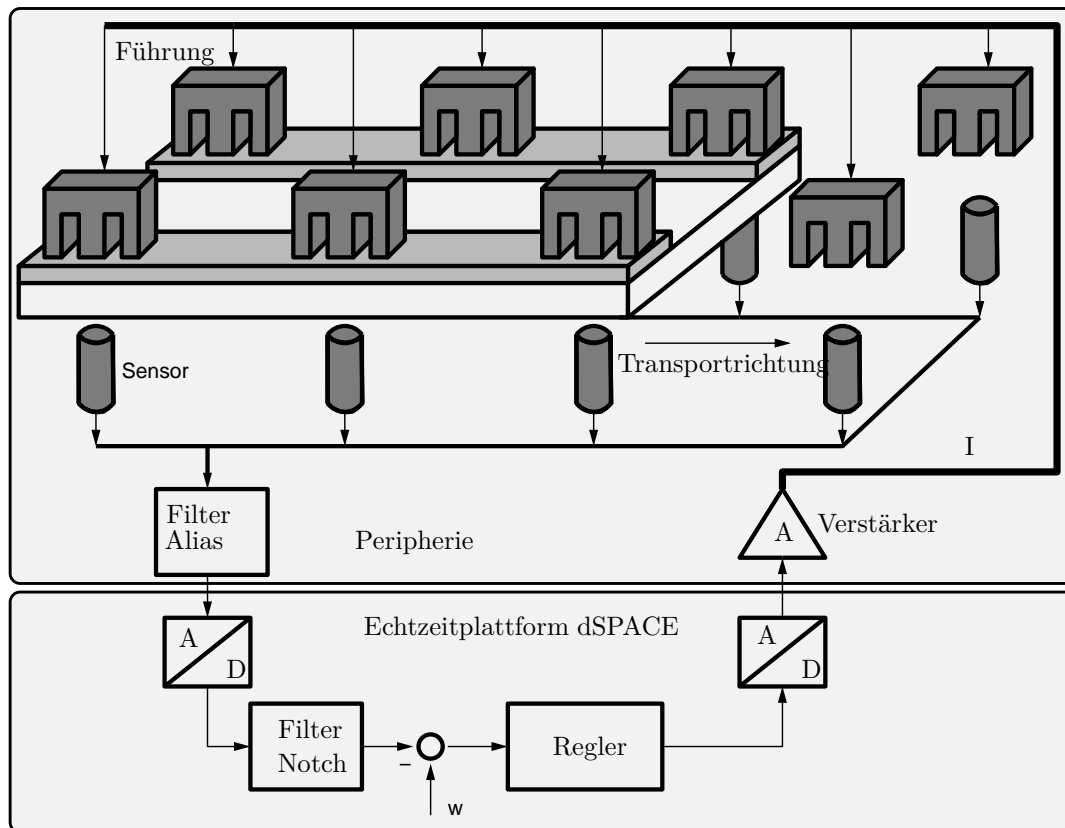


Abbildung 4.1: Mechatronisches Gesamtsystem

4.1 Modellbildung der mechanischen Strecke

In das Modell der mechanischen Strecke fließt sowohl das Verhalten der freien Masse der Platte, wie auch die Position der Aktoren und Sensoren in Abhängigkeit vom Schwerpunkt der Platte ein. Zudem spielt die Anzahl der Führungen eine wichtige Rolle, da sich diese mit der Transportbewegung verändert und zu unterschiedlichen Zuständen des Systems führt. Das Grundelement der mechanischen Strecke ist die massive Platte aus Aluminium mit den Ankern aus Elektroblech in Abbildung 3.3. Das Koordinatensystem und die Kraftangriffspunkte der Führungen sind in der Abbildung 4.2 dargestellt, wobei zur besseren Übersichtlichkeit die Anker nicht gezeichnet sind. Da sich die Anzahl der Führungen ändert, sind in der Abbildung die zwei sich am Transportsystem einstellenden Zustände abgebildet. Im Zustand A ist das Koordinatensystem für vier angreifende Führungen gezeigt und im Zustand B für sechs Führungen. Die Positionen der Führungen in Transportrichtung sind mit a_1 bis a_6 und die Position des Schwerpunktes mit x_s gekennzeichnet.

Für die Modellbildung ist es notwendig, die Lage des Gesamtschwerpunktes der Plat-

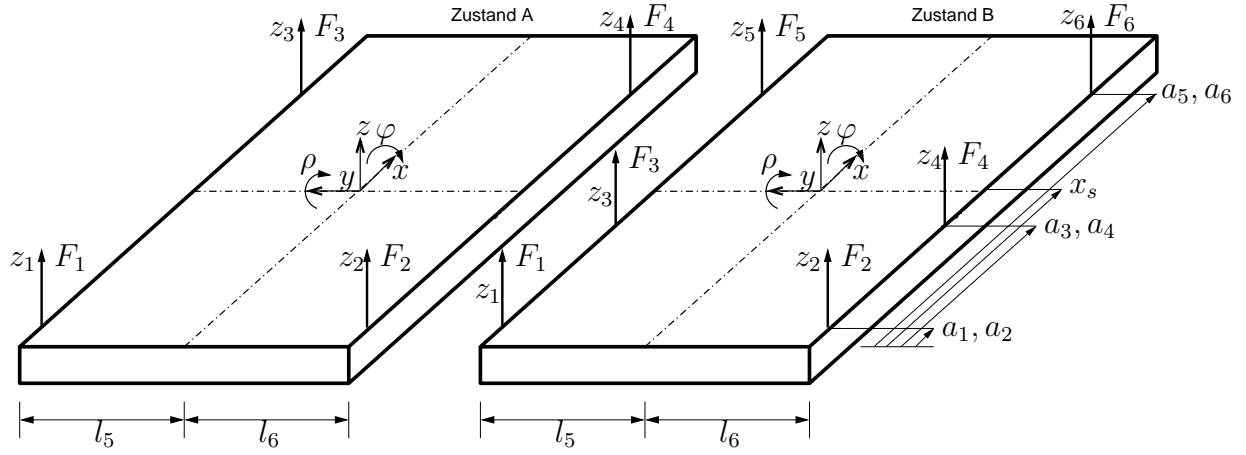


Abbildung 4.2: Koordinatensystem an der Platte

te zu kennen, da dies der Bezugspunkt für die Erstellung der Bewegungsgleichungen ist. Die Platte ist um die x und y Achse symmetrisch aufgebaut. Daher liegt der Gesamtschwerpunkt im Ursprung des Koordinatensystems, dessen Nullpunkt in der Mitte der Platte liegt. Auf der z Achse ist der Schwerpunkt in positive Richtung, aufgrund der aussermittigen Position der Anker verschoben.

$$z_{sp} = \frac{\sum m_i z_{spi}}{\sum m_i} \quad (4.1)$$

Mit Hilfe der Gleichung 4.1 wird die Lage des Gesamtschwerpunktes auf der z Achse berechnet. Dabei ist z_{spi} die Lage der Schwerpunkte der einzelnen Bauteile in z Richtung. m_i bezeichnet die Massen der einzelnen Bauteile.

Für die Bewegungsgleichungen werden als Parameter die Gesamtmasse und die Massenträgheiten um die x und y Achse benötigt. Dafür wird der zuvor bestimmte Gesamtschwerpunkt des Systems als Bezugspunkt genutzt. Die Massenträgheiten setzen sich nach [15] aus den Massenträgheiten der einzelnen Bauteile und deren Steineranteil bezüglich des Gesamtschwerpunktes zusammen. In Tabelle 4.1 sind die Ergebnisse für die Parameter der Bewegungsgleichung aufgeführt.

Die Platte ist mechanisch nicht gefesselt und stellt eine freie Masse dar. Die für die Simulation zu betrachtenden Freiheitsgrade am Schwerpunkt sind die Rotation φ um die x Achse, die Rotation ρ um die y Achse und die translatorische Bewegung in Richtung der z Achse. Die Bewegungsgleichungen in Matrixschreibweise für den Schwerpunkt lauten:

Tabelle 4.1: Parameter der Bewegungsgleichung

Parameter	Wert
θ_x	0.291 kg/m ²
θ_y	2.5508 kg/m ²
m_z	40.81 kg

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \theta_x & 0 & 0 \\ 0 & \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}} \underbrace{\begin{bmatrix} \ddot{\varphi} \\ \ddot{\rho} \\ \ddot{z} \end{bmatrix}}_{\underline{\ddot{q}}_s} = \underbrace{\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ F_z \end{bmatrix}}_{\underline{F}_s} \quad (4.2)$$

Für den Zusammenhang der Auslenkungen an den Lagerstellen $\underline{q}_l = [z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6]$ und den Bewegungen des Schwerpunktes $\underline{q}_s = [\varphi, \rho, z]$ wird eine Transformationsmatrix \mathbf{T}_q benötigt. Ebenso wird für den Zusammenhang zwischen den Kräften an den Lagerstellen $\underline{F}_l = [F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6]$ und den Kräften am Schwerpunkt $\underline{F}_s = [M_x, M_y, F_z]$ eine Transformationsmatrix \mathbf{T}_f benötigt. Diese können aus den geometrischen Beziehungen zwischen den Positionen der Führungen und Sensoren und der Position des Schwerpunktes x_s bestimmt werden. Als Vereinfachung gilt hierbei für kleine Winkel $\sin \varphi = \varphi$ und dass die Transformationsmatrizen zeitinvariant sind.

$$\underline{q}_l = \mathbf{T}_q \underline{q}_s \quad (4.3)$$

$$\underline{F}_s = \mathbf{T}_f \underline{F}_l \quad (4.4)$$

Damit die Beziehung (4.3) in Gleichung (4.2) eingesetzt werden kann, muss von der nichtquadratischen Matrix \mathbf{T}_q die Pseudoinverse \mathbf{T}_q^+ nach [39] berechnet werden.

Durch Einsetzen der Beziehungen aus (4.3) und (4.4) in (4.2) und Umstellen nach $\underline{\ddot{q}}_l$ ergibt sich Gleichung (4.6).

$$\mathbf{M} \mathbf{T}_q^+ \underline{\ddot{q}}_l = \mathbf{T}_f \underline{F}_l \quad (4.5)$$

$$\underline{\ddot{q}}_l = (\mathbf{M} \mathbf{T}_q^+)^+ \mathbf{T}_f \underline{F}_l \quad (4.6)$$

Durch Umformen des Terms $(\mathbf{M} \mathbf{T}_q^+)^+$ aus Gleichung (4.6) in $\mathbf{T}_q \mathbf{M}^{-1}$ nach den Regeln aus [4] für pseudoinverse Matrizen, erhält man Gleichung (4.7).

$$\ddot{\underline{q}}_l = \mathbf{T}_q \mathbf{M}^{-1} \mathbf{T}_f \underline{F}_l. \quad (4.7)$$

Überführt man Gleichung (4.7) durch eine Laplacetransformation in den Frequenzbereich erhält man die Übertragungsfunktionen (4.8) von den Lagerkräften auf die Auslenkungen in den einzelnen Lagerstellen.

$$\mathbf{G}_{mech}(s) = \frac{\underline{q}_l(s)}{\underline{F}_l(s)} = \mathbf{T}_q \frac{\mathbf{M}^{-1}}{s^2} \mathbf{T}_f = \mathbf{T}_q \mathbf{G}_s(s) \mathbf{T}_f \quad (4.8)$$

$\mathbf{G}_{mech}(s)$ ist ein Mehrgrößensystem, bei dem die einzelnen Freiheitsgrade der Lager untereinander gekoppelt sind. Zur Darstellung mechanischer Mehrgrößensysteme eignet sich nach [36] die Zustandsraumdarstellung, wie in Gleichung 4.9 gezeigt. Mit Hilfe dieser Darstellungsform lassen sich die Teilsysteme einfach miteinander verknüpfen. Daher wird für das zu simulierende Modell diese Darstellungsform gewählt.

$$\begin{aligned} \dot{\underline{x}}(t) &= \mathbf{A} \underline{x}(t) + \mathbf{B} \underline{u}(t) \\ \underline{y}(t) &= \mathbf{C} \underline{x}(t) + \mathbf{D} \underline{u}(t) \end{aligned} \quad (4.9)$$

4.1.1 Simulation der Bewegung des Schwerpunktes in Transportrichtung

Das Ziel der Simulation ist die Darstellung der Bewegungen des Schwerpunktes der Platte während eines Transportvorgangs. Durch die Transportbewegung variieren die Abstände zwischen den Führungen und dem Schwerpunkt der Platte. Durch diese Ursache ändert sich der Zusammenhang zwischen den Auslenkungen \underline{q}_l an den Lagerstellen und den Auslenkungen \underline{q}_s des Schwerpunktes und der Zusammenhang zwischen den Kräften \underline{F}_l an den Lagerstellen und den Kräften \underline{F}_s am Schwerpunkt während der Simulation. Die Zusammenhänge werden durch die Transformationsmatrizen \mathbf{T}_q und \mathbf{T}_f beschrieben. Diese müssen sich somit während der Simulation verändern und können, als Funktion der Lage des Schwerpunktes beschrieben werden. Die Änderung der Matrizen betrifft zum einen die Dimension $m \times n$ und zum anderen die Werte innerhalb der Matrizen. Die Dimensionen der Matrizen ändern sich mit der Anzahl an aktiven Führungen und Sensoren. Die Werte innerhalb der Matrizen ändern sich durch die sich ändernden Abstände zwischen dem Schwerpunkt und den Führungen.

Zustand A

Wie in Abbildung 4.2 dargestellt befinden sich in Zustand A vier Aktoren und vier Sensoren im Eingriff. Die Transformationsmatrizen für die Auslenkungen \mathbf{T}_q und die Kräfte \mathbf{T}_f ergeben sich für diesen Zustand zu

$$\underbrace{\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix}}_{\underline{q}_l} = \underbrace{\begin{bmatrix} l_5 & a_1 - x_s & 1 \\ l_6 & a_2 - x_s & 1 \\ l_5 & a_3 - x_s & 1 \\ l_6 & a_4 - x_s & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{T}_q} \underbrace{\begin{bmatrix} \varphi \\ \rho \\ z \end{bmatrix}}_{\underline{q}_s} \quad (4.10)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ F_z \end{bmatrix}}_{\underline{F}_s} = \underbrace{\begin{bmatrix} l_5 & l_6 & l_5 & l_6 \\ a_1 - x_s & a_2 - x_s & a_3 - x_s & a_4 - x_s \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{T}_f} \underbrace{\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix}}_{\underline{F}_l} \quad (4.11)$$

Durch die Bewegung des Schwerpunktes und die sich damit verändernden Abstände, ändern sich die grau hinterlegte Spalte in der Matrix \mathbf{T}_q und die grau hinterlegte Zeile in der Matrix \mathbf{T}_f . Die nicht grau hinterlegten Werte in der Matrix sind innerhalb des Zustandes nicht abhängig von der Position x_s des Schwerpunktes und somit über den Simulationsverlauf konstant.

Zustand B

Zustand B unterscheidet sich von Zustand A in der Anzahl aktiver Sensoren und Aktoren. In diesem Zustand stehen zur Positionsmessung und Lagerung der Platte sechs Sensoren und sechs Aktoren zur Verfügung. Dadurch ändert sich die Dimension $m \times n$ der Matrizen \mathbf{T}_q und \mathbf{T}_f gegenüber Zustand A. Die Matrizen sind den Gleichungen (4.12) und (4.13) dargestellt. In diesen Matrizen sind wie für die Matrizen in Zustand A, die Zeile und Spalte die sich mit der Transportbewegung ändert, grau hinterlegt.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \\ z_6 \end{bmatrix}}_{\underline{q}_l} = \underbrace{\begin{bmatrix} l_5 & a_1 - x_s & 1 \\ l_6 & a_2 - x_s & 1 \\ l_5 & a_3 - x_s & 1 \\ l_6 & a_4 - x_s & 1 \\ l_5 & a_5 - x_s & 1 \\ l_6 & a_6 - x_s & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{T}_q} \underbrace{\begin{bmatrix} \varphi \\ \rho \\ z \end{bmatrix}}_{\underline{q}_s} \quad (4.12)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ F_z \end{bmatrix}}_{\underline{F}_s} = \underbrace{\begin{bmatrix} l_5 & l_6 & l_5 & l_6 & l_5 & l_6 \\ a_1 - x_s & a_2 - x_s & a_3 - x_s & a_4 - x_s & a_5 - x_s & a_6 - x_s \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{T}_f} \underbrace{\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{bmatrix}}_{\underline{F}_l} \quad (4.13)$$

Da sich aufgrund des gezeigten Zusammenhangs während der Simulationszeit die Matrizen für die Transformationen ändern müssen, wird innerhalb des Modells ein Algorithmus implementiert, der in jedem Zeitschritt die Transformationen neu berechnet. Der Ablauf des Algorithmus ist in Abbildung 4.3 dargestellt.

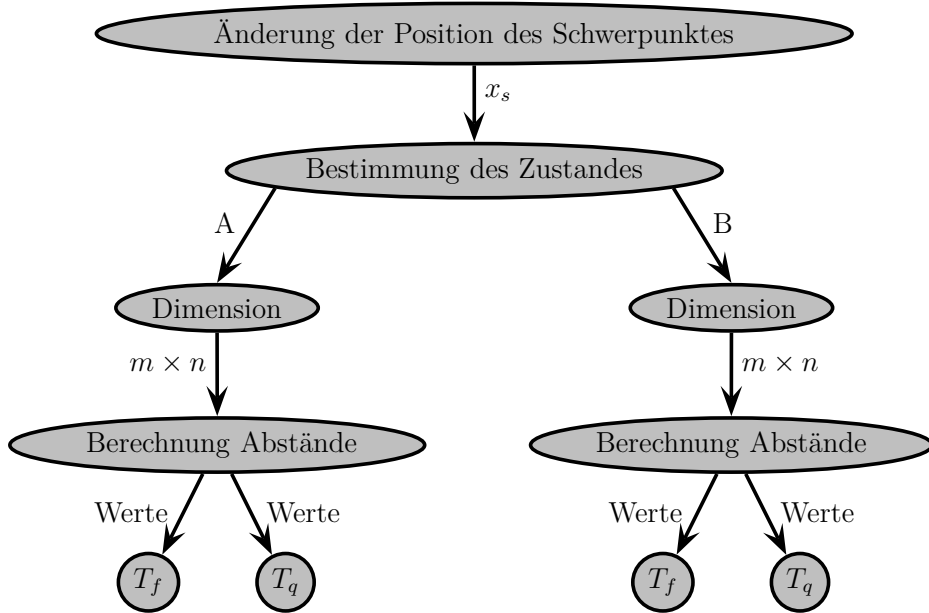


Abbildung 4.3: Ablauf der Manipulation der Transformationsmatrizen

In einem ersten Schritt wird die Anzahl an aktiven Führungen und an aktiven Sensoren ermittelt. Aus diesen Informationen wird der Zustand des Systems bestimmt und die Dimensionen der beiden Matrizen festgelegt. Im Anschluss daran werden aus den Positionsinformationen der Führungen und der aktuellen Lage des Schwerpunktes die Abstände berechnet. Diese Werte werden in die sich ändernden Zeilen und Spalten der Matrizen eingetragen. Mit diesen Matrizen werden dann in dem aktuellen Zeitschritt die

Kräfte und Auslenkungen am Schwerpunkt bestimmt.

4.1.2 Mechanisches Gesamtmodell der bewegten Platte

Das mechanische Gesamtmodell für die Simulation besteht aus zwei Komponenten. Die erste ist eine Zustandsraumbeschreibung, die das Verhalten des dynamischen Systems nach Gleichung (4.8) abbildet. Die zweite Komponente ist die Funktion zur Manipulation der Transformationsmatrizen während der Simulationszeit. In Abbildung 4.4 ist das Blockschaltbild mit den beiden Komponenten, wie es in der Simulation benutzt wird abgebildet.

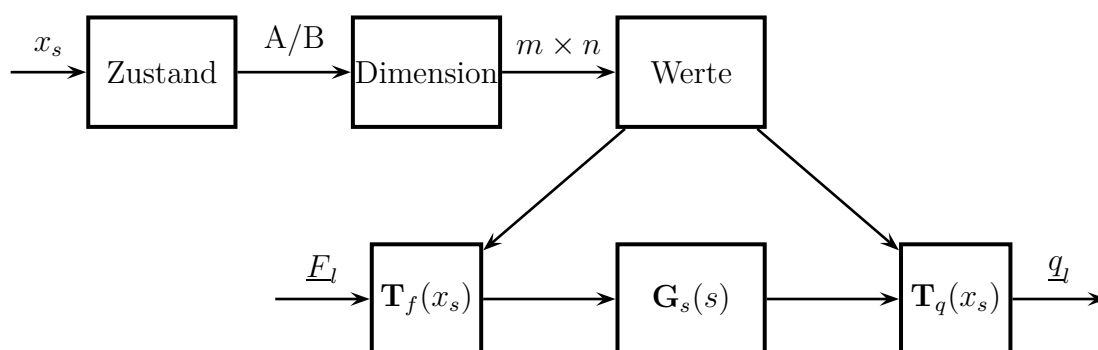


Abbildung 4.4: Blockschaltbild des mechanischen Modells

4.2 Modellbildung der elektromagnetischen Aktoren

Für die Simulation im Zeitbereich wird ein Modell der elektromagnetischen Aktoren der Führungen benötigt. Diese werden durch experimentelle Modellbildung gewonnen. Bei den elektromagnetischen Aktoren sind zwei Eigenschaften für die Modellbildung von Interesse. Zum einen ist dies die Dynamik der Aktoren, die sich aus den elektrischen Größen der Spulen und dem Leistungsvermögen der Verstärker bildet. Zum anderen ist für das Modell der Aktoren der Zusammenhang zwischen den Kräften, Strömen und Luftspalten von Bedeutung. Durch die Kombination des dynamischen Verhaltens und der Kraft-Strom-Luftspalt Beziehung lassen sich hinreichend genaue Modelle der Aktoren bilden, die in das Gesamtmodell integriert werden können. Im Weiteren Verlauf der Beschreibung und der Ergebnisdarstellung für die Modellbildung der elektromagnetischen Aktoren wird die Vorgehensweise exemplarisch für einen Aktor des Transportsystems gezeigt.

4.2.1 Modell der Dynamik

Zur Bestimmung der Dynamik der stromgeregelten Aktoren wird die Führungsübertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises aus Abbildung 4.5 von I_{soll} zu I_{ist} gemessen. Als Verstärker steht ein stromgeregeltes Modell der Firma MECOS TRAXLER AG mit der Bezeichnung MBE8-50 zur Verfügung.

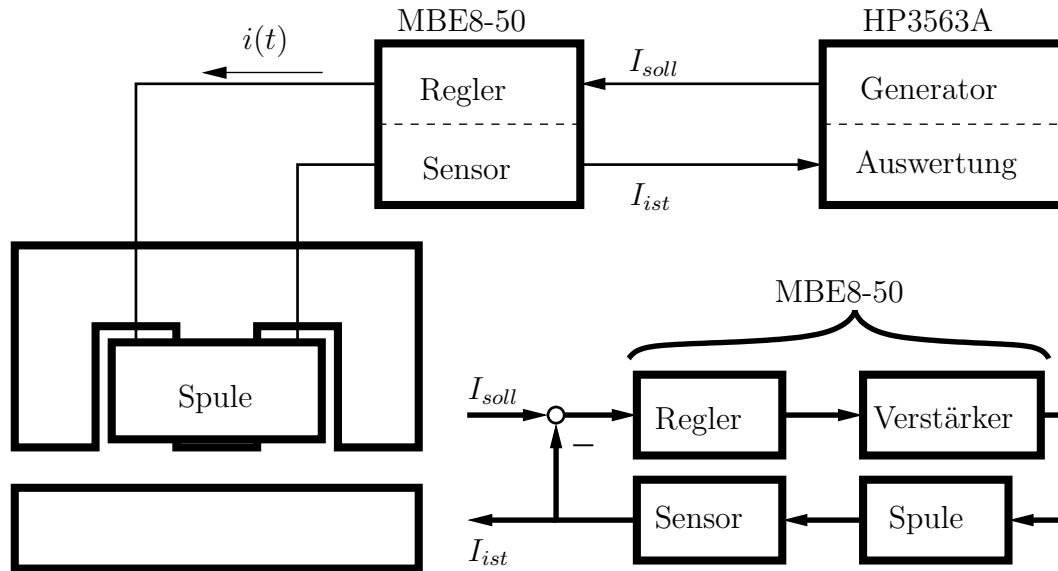


Abbildung 4.5: Messkette zur Messung der Übertragungsfunktion eines elektromagnetischen Aktors

Die Messung wird mit einem Control System Analyzer (Modell HP3563A) von Hewlett Packard am nominellen Arbeitspunkt (i_0, s_0) , der sich während des Betriebes am Transportsystem einstellt, durchgeführt. Der Analyzer generiert dafür einen Gleitsinus als Stromsollsignal und misst über den internen Stromsensor des Verstärkers den sich einstellenden Iststrom der Spule.

Aus diesen beiden Informationen wird ein Amplituden- und Phasengang gebildet. Diese sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Der Verlauf zeigt das Verhalten eines Verzögerungsgliedes 1. Ordnung, da die Spule mit ihrer großen Induktivität und ihrem ohmschen Widerstand die Hauptcharakteristik des Kreises darstellt. Von daher ist es möglich diesen Verlauf mittels eines Verzögerungsgliedes 1. Ordnung, wie in Gleichung 4.14 gezeigt, im Modell abzubilden.

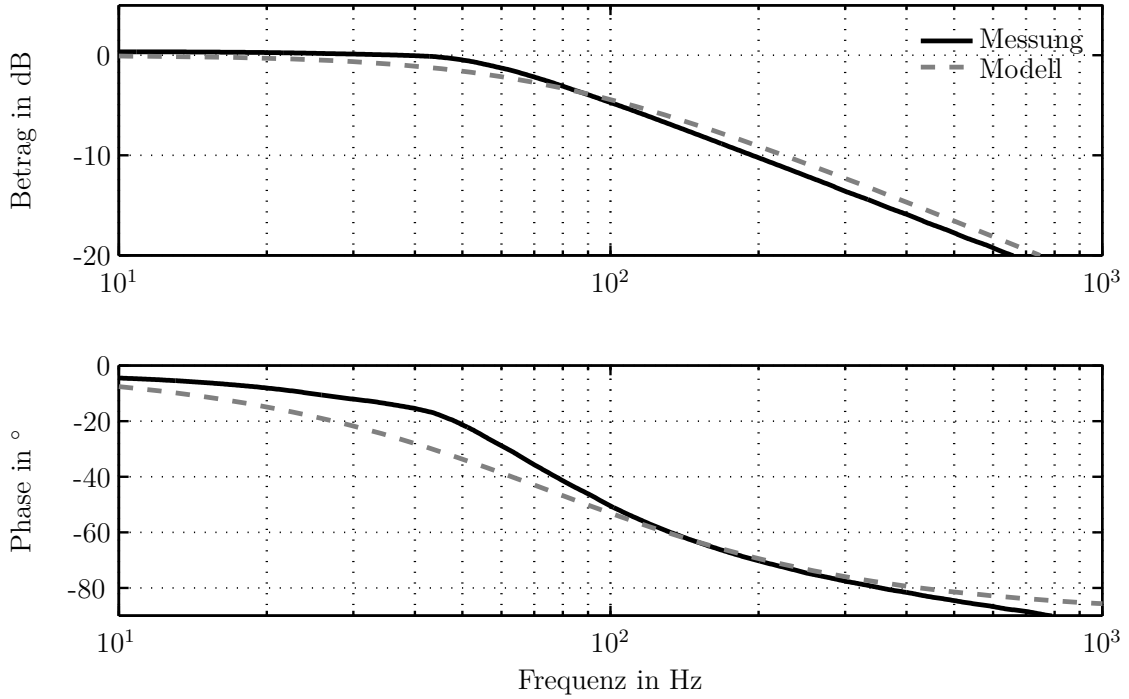


Abbildung 4.6: Dynamik eines Aktors am nominellen Arbeitspunkt

$$G_{\text{Aktor}}(s) = \frac{I_{\text{ist}}}{I_{\text{soll}}} = \frac{1}{T_A s + 1} \quad (4.14)$$

$$T_A = \frac{1}{\omega_e} \quad (4.15)$$

Dazu wird die Knickfrequenz ω_e des Amplitudenganges benötigt. Diese kann man bei einem Abfall des Amplitudenganges um -3dB von der waagerechten Asymptote bestimmen. Für die in Abbildung 4.6 dargestellten Messdaten liegt die Frequenz ω_e bei ca. 80 Hz. Bei einem Vergleich des Übertragungsverhaltens zwischen Modell und realer Strecke in Abbildung 4.6 fallen kleine, konservative Abweichungen im Amplituden- und Phasengang auf. Diese sind für das prinzipielle Modellverhalten aber von untergeordneter Bedeutung. Daher kann das Modell genutzt werden um, das dynamische Verhalten der Strecke zu simulieren.

4.2.2 Modell für die Beziehung zwischen Kraft, Strom und Weg

Wie in Abschnitt 2.2 dargestellt hängt die magnetische Kraft nichtlinear von den Größen Luftspalt und Strom ab. Für kleine Ströme und kleine Luftspalte kann mittels der Gleichung (2.13) eine idealisierte Näherung der Kraft gefunden werden. Sobald Ströme und Luftspalte größer werden, und die Einflüsse von Sättigungseffekten und Streuflüssen zunehmen, wird die Abweichung von der Näherungslösung größer, wie in [18] beschrieben. Aufgrund der Abweichungen der Näherungslösung ist es notwendig, für die Erstellung eines Modells die Größen Kraft, Strom und Luftspalt messtechnisch zu erfassen und eine geeignete Ansatzfunktion zu finden, um diese Beziehung zu beschreiben.

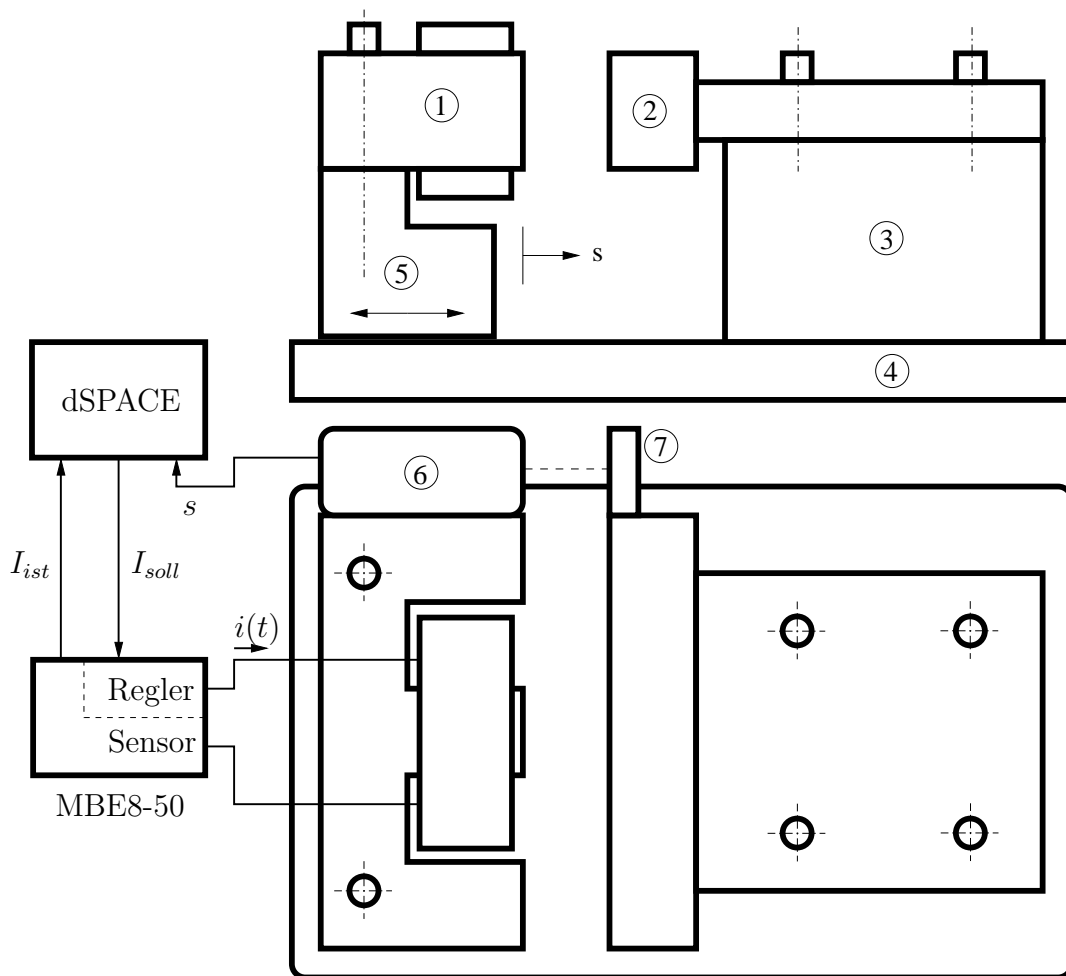


Abbildung 4.7: Prüfstand zur Vermessung des Kraftkennfeldes

Zur Vermessung des Kraftkennfeldes wurde ein spezieller Versuchsstand konstruiert und aufgebaut, wie er in Abbildung 4.7 dargestellt ist. Dieser ermöglicht die Messung der Kraft bei beliebigen Strömen und Luftspalten. Die Kraft wird mittels einer Kraftmess-

plattform des Herstellers Kistler [22], deren Prinzip auf dem piezoelektrischen Effekt beruht, gemessen. Aufgrund der großen Steifigkeit der Kraftmessplattform, die größer als ein $\text{kN}/\mu\text{m}$ ist, kann die Kraft quasi weglos gemessen werden. Zu beachten ist hierbei, dass der gesamte Aufbau eine ausreichende Steifigkeit besitzen muss, um bei kleinen Luftspalten und hohen Strömen ein Anschlagen des Magneten am Anker, aufgrund von Dehnungen, zu vermeiden. Trotz der hohen Steifigkeit lassen sich Dehnungen während den Messungen nicht vollständig vermeiden. Aus diesem Grund wird die Größe des Luftspaltes mit einem Lasersensor permanent vermessen. Dieser ist so angebracht, dass bei auftretenden Dehnungen die Änderung des Luftspaltes erfasst wird. So wird garantiert, dass die sich einstellende Kraft am richtigen Luftspalt ermittelt wird. Über einen Schlitten, auf dem der Magnet befestigt ist, kann der nominelle Luftspalt eingestellt werden. Die Leistungsverorgung der Spule erfolgt wie bei der dynamischen Messung mittels der Endstufen MBE8-50.

Tabelle 4.2: Bauteile der Messeinrichtung

Bezeichnung	Nummer
Magnetjoch	1
Anker	2
Dynamometer [22]	3
Grundplatte	4
Schlitten	5
Lasersensor	6
Targetfläche	7

Der Messablauf ist durch ein Messprogramm, welches auf einem echtzeitfähigen Controller Board der Firma dSPACE läuft, soweit automatisiert, das der Benutzer zu Beginn der Messung nur den nominellen Luftspalt über den Schlitten einstellen muss. Im Anschluss werden durch das Programm die nominellen Ströme nacheinander eingestellt und der sich ergebende Luftspalt ermittelt. Zu jeder Kombination aus Luftspalt und Strom wird die entstehende Kraft aufgezeichnet. Aus den Messungen entsteht ein Kraft–Strom–Weg Kennfeld, das in Abbildung 4.8 dargestellt ist.

Modellierung des gemessenen Kraftkennfeldes

Das Kraft-Strom-Weg Verhalten des Kennfeldes aus Abbildung 4.8 soll durch ein analytisches Modell beschrieben werden. In [18] wird vorgeschlagen, die analytische Funktion an die Struktur des idealen Magnetkraftgesetzes aus Gleichung (2.13) anzulehnen.

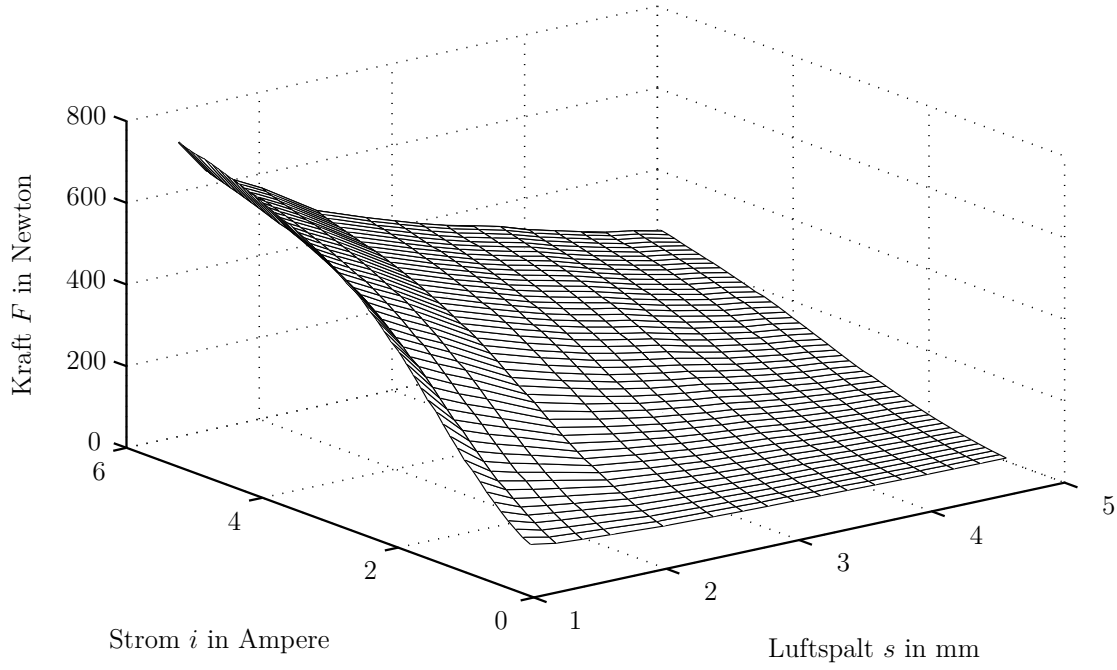


Abbildung 4.8: Gemessenes Kennfeld eines elektromagnetischen Aktors

Aus dieser Überlegung resultiert der Polynomansatz in Gleichung (4.16).

$$F(i, s) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^N C_{mn} \frac{i^m}{s^q} \quad (4.16)$$

Unter der Vorgabe der Polynomgrenzen M , N und des Exponenten q können mittels einer nichtlinearen Methode der kleinsten Fehlerquadrate [8] die Parameter C_{mn} des Polynoms bestimmt werden. Der Exponent m des Stromes beginnt bei dem Wert $m = 1$, da mit dem Wert $m = 0$ eine magnetische Kraft für den stromlosen Zustand berechnet würde, was physikalisch nicht richtig ist. In Abbildung 4.9 ist ein Vergleich zwischen den Messdaten und dem Ergebnis der Approximation, mit den Parametern $M = 5$, $N = 4$, $q = 0.9$, durch das Polynom aus Gleichung (4.16) gezeigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Polynomansatz die Charakteristik des gemessenen Feldes gut abbildet.

Für eine Fehlerbetrachtung, ist die vergleichende Darstellung aus Abbildung 4.8 ungeeignet. Daher wird für die approximierte Lösung der relative Fehler auf Basis der Messwerte bestimmt. In Abbildung 4.10 ist der relative Fehler über Weg und Strom aufgetragen. Der Fehler bewegt sich in dem für die Simulation relevanten Bereich um $\pm 5\%$. Nur an den Rändern hin zu kleinen Strömen treten vereinzelt Fehler von bis zu 10% auf. Ein Fehler von $\pm 5\%$ ist für die Simulation akzeptabel, von daher kann das approximierte Polynom für die Modellbildung des Aktors genutzt werden.

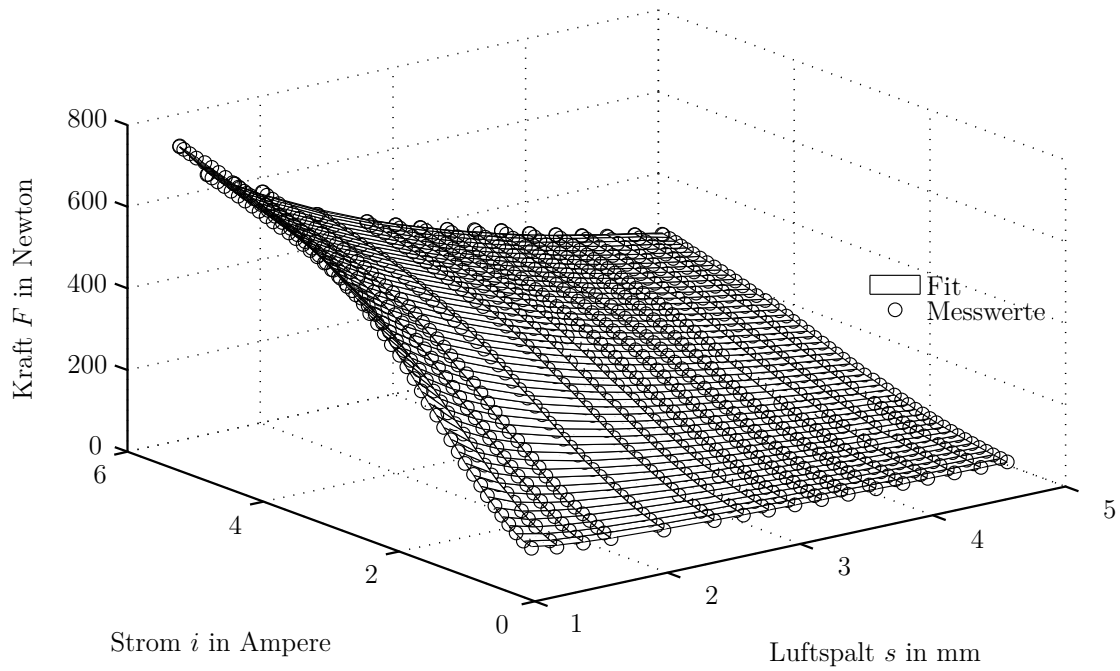


Abbildung 4.9: Vergleich der Messdaten mit der approximierten Lösung des Polynoms

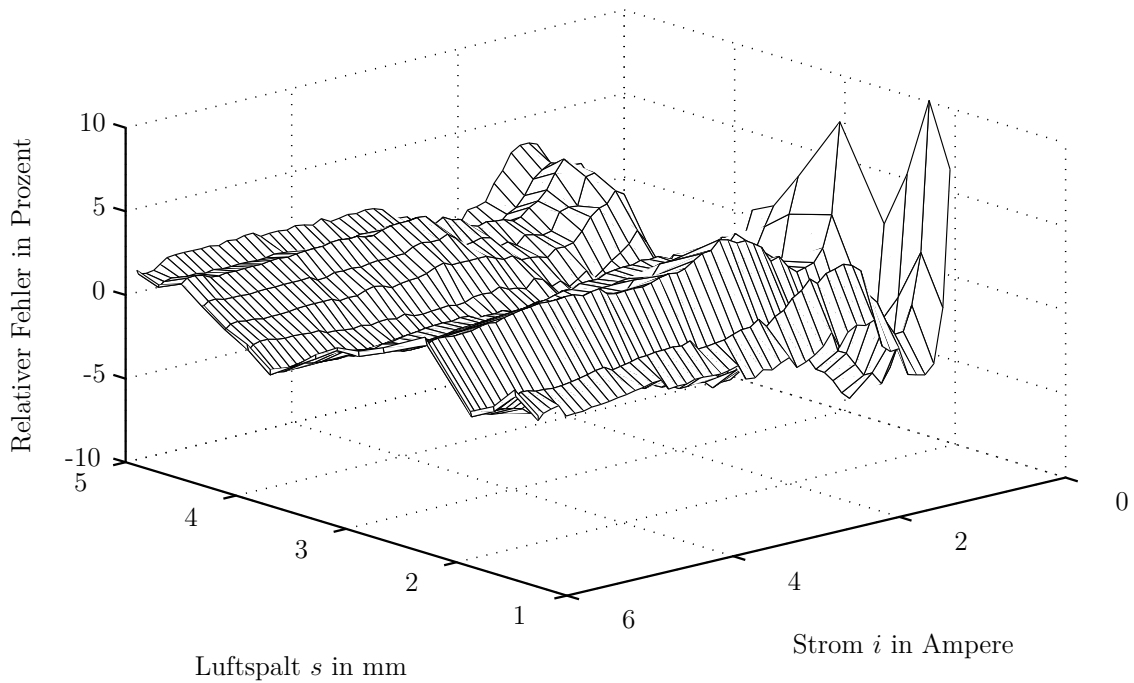


Abbildung 4.10: Relativer Fehler der approximierten Lösung

Gesamtmodell des elektromagnetischen Aktors

Das Gesamtmodell für einen elektromagnetischen Aktor einer Führung, wird durch die Kombination aus dem dynamischen Modell des Aktors und dem Polynom mit seinen approximierten Parametern für die Kraft–Strom–Weg Beziehung gebildet. Der Zusammenschluss beider Modellteile ist in Abbildung 4.11 dargestellt.

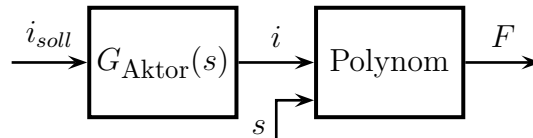


Abbildung 4.11: Gesamtmodell des Aktors

4.3 Modell der Sensorik

Die Dynamik der Wegsensoren am Prüfstand liegt außerhalb des Betriebsbereich des Systems und hat somit keinen nennenswerten Einfluss auf das Systemverhalten. Für das Modell wird das Verhalten der Sensoren linear angenommen.

$$\mathbf{G}_{\text{Sensor}}(s) = \mathbf{K}_{\text{Sensor}} \quad (4.17)$$

4.4 Gesamtmodell des Transportsystems

Das Gesamtmodell wird durch die Kombination der in diesem Kapitel vorgestellten Teilmodelle bestehend aus der starren, bewegten Platte, den Führungen mit elektromagnetischen Aktoren, den Sensoren und den Reglern in Matlab/Simulink gebildet. In Abbildung 4.12 ist das gesamte Modell als Blockschaltbild dargestellt. Die benötigten Werte für die Bewegung des Schwerpunktes x_s während der Simulation, werden mittels einer stetigen Funktion innerhalb der Simulation berechnet. Die Parameter a_i für die Positionen der Führungen werden vor Beginn der Simulation als Simulationsparameter vorgegeben. Durch das Modell sollen die realen physikalischen Zusammenhänge, des in Kapitel 3 dargestellten Transportsystems, abgebildet werden. Hierfür wird ein Vergleich zwischen dem realen Systemverhalten und dem Verhalten des Modells erstellt. Als Gütekriterium für die Validierung eignen sich die Auslenkungen ρ und z_s des Schwerpunktes.

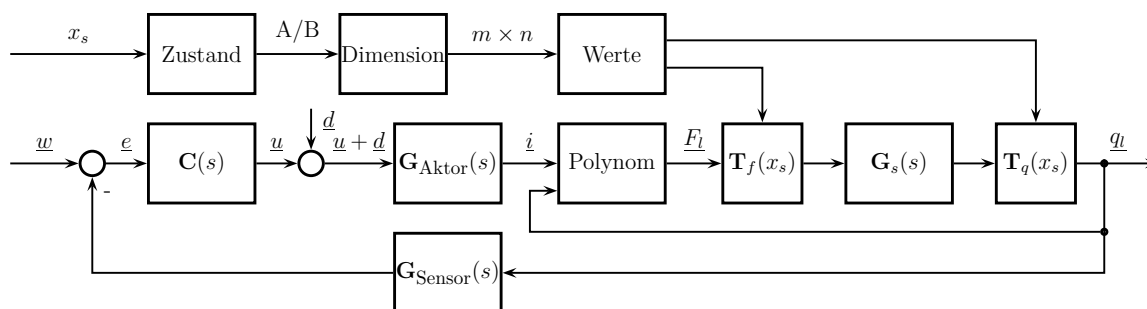


Abbildung 4.12: Blockschaltbild des Gesamtmodells

Diese Größen werden am Modell und am Prüfstand unter gleichen Bedingungen ermittelt.

In Abbildung 4.13 ist der Vergleich zwischen der Auslenkung z_s des Modells und des Prüfstandes dargestellt. Beide Kurven zeigen den, für das System charakteristischen parabelförmigen Verlauf. Dabei bewegt sich der Verlauf auf unterschiedlichen Niveaustufen. Auf die Ursachen dieses Verlaufs wird in Abschnitt 5.1 näher eingegangen. Die Abweichungen im Intervall $x_s = 0,4$ bis $0,5$ Metern sind auf einen Sensorfehler zurückzuführen, da hier die induktiven Wegsensoren durch eine Inhomogenität des Werkstoffs der Platte, gestört werden. Die kleine Abweichung von $0,01 \cdot 10^{-3}$ Metern im Intervall $x_s = 0,6$ bis $0,7$ Meter, entsteht durch Ausrichtungsfehler der Sensoren am Prüfstand. Im Verlauf der Simulationsdaten fällt eine Asymmetrie in den Sprüngen zwischen den unterschiedlichen Höhenniveaus auf. In die Transformation zur Berechnung des Verlaufs des Schwerpunktes, fließen die Daten der Abstandssensoren ein. Durch das An- und Abschalten der Sensoren, an den Übergabepositionen, entstehen unstetige Verläufe. Diese Unstetigkeiten verfälschen die Transformation der Lagerkoordinaten auf die Lage des Schwerpunktes, was zu dem nichtsymmetrischen Verlauf führt.

In Abbildung 4.14 ist die Auslenkung des Winkels ρ des Schwerpunktes dargestellt. Die Charakteristik des Verlaufs wird durch das Modell gut abgebildet. Die zuvor getroffenen Aussagen bezüglich der Abweichungen treffen auch hier zu.

4.5 Beurteilung der Modellgüte

Das Modell dient als Werkzeug zur Untersuchung physikalischer Zusammenhänge eines Transportsystems mit feststehenden aktiven Führungen und passivem bewegten Teil. Mit diesem sollen die Einflussgrößen identifiziert werden, von denen das Verhalten des Gesamtsystems abhängt. Der Vergleich zwischen dem Verhalten des Modells und dem

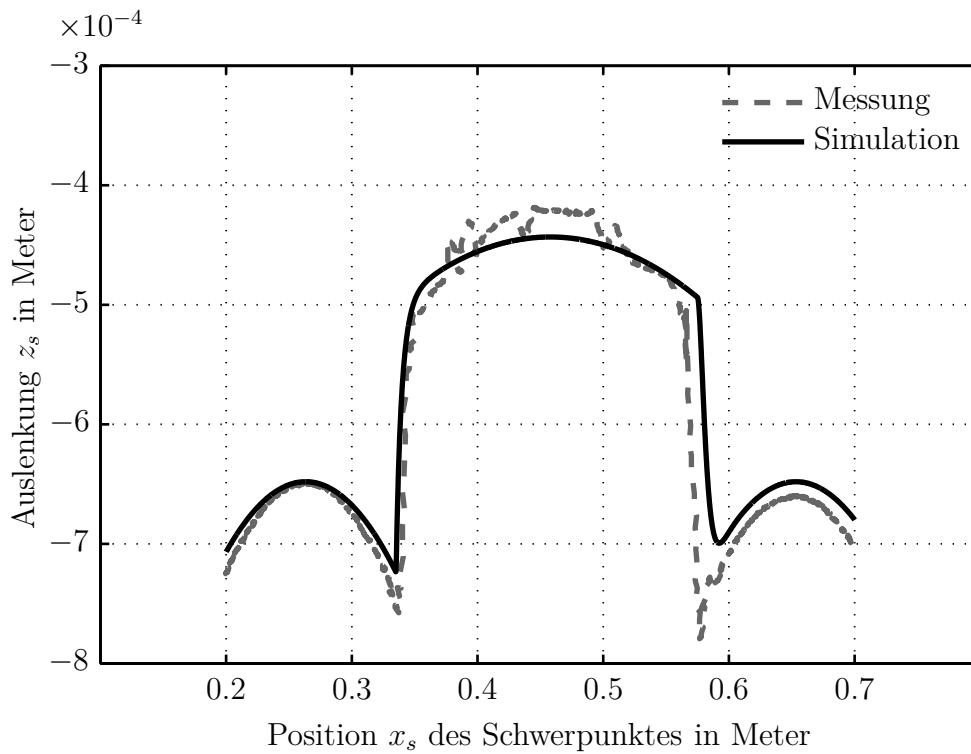


Abbildung 4.13: Vergleich der Verläufe der Auslenkung zwischen Simulation und Messung

Verhalten des Prüfstandes zeigt, bezogen auf die Auslenkungen, dass das Modell die Eigenschaften des Transportsystems in hinreichender Genauigkeit abbildet, um mit den erzielten Erkenntnissen Rückschlüsse auf das Verhalten des realen Systems zu gewinnen.

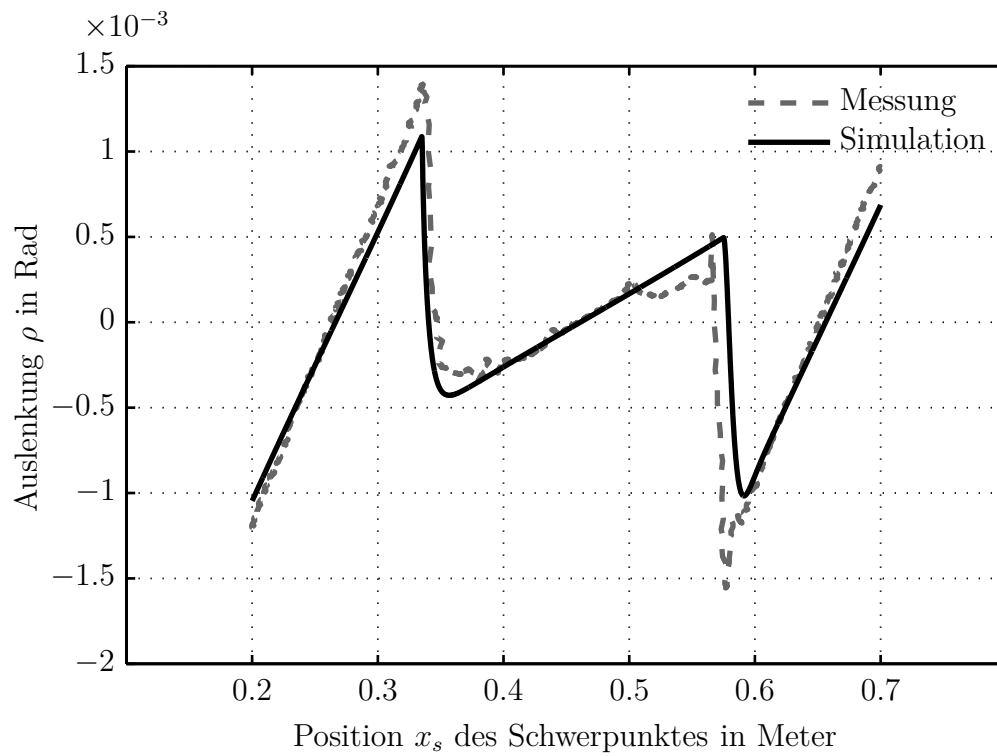


Abbildung 4.14: Vergleich der Verläufe der Auslenkung zwischen Simulation und Messung

5 Regelungsstrategie für das Transportsystem

In diesem Kapitel werden, ausgehend von einem dezentralen Regelungskonzept, die Eigenschaften des geregelten Transportsystems hinsichtlich der entstehenden Trajektorie der Platte und der Stabilität des Systems beschrieben. Im Anschluss daran werden die Abhängigkeiten der Eigenschaften von den Systemeinflüssen, wie dem mechanischen Aufbau, den nichtlinearen Aktoren und der Transportbewegung aufgezeigt. Mittels des in Kapitel 4 beschriebenden Modells wird eine Lösung dargestellt, die es ermöglicht unter Beibehaltung der dezentralen Regelungsstruktur die Trajektorie der Platte aktiv zu beeinflussen.

5.1 Dezentrales Regelungskonzept und entstehende Trajektorie bei der Transportbewegung

Das grundlegende Ziel der Regelung ist es, die Platte in einem stabilen Schwebezustand zu halten, um die berührungslose Transportbewegung zu ermöglichen. Eine einfache Regelung, welche die Grundbedingung erfüllt, ist eine dezentrale Regelung. Hierbei wird jeder Freiheitsgrad einer Führung z_j durch einen einzelnen Regler, wie in Abbildung 5.1 dargestellt, geregelt. Die Regelgröße ist die Auslenkung z_j der Platte an der Position der jeweiligen Führung.

Zur stabilen Lagerung einer starren, ungefesselten Masse werden eine Geschwindigkeitsrückführung und die Rückführung der Lage benötigt. Diese verschieben die Pole des Systems aus dem Ursprung in die linke Halbebene eines Pol–Nullstellendiagramms und stabilisieren somit das System. Das Verhalten des Positions geregelten Systems ist mit dem eines Feder–Dämpfer-Systems vergleichbar. Aufgrund der Bauweise des Transportsystems befinden sich immer mehrere Führungen gleichzeitig im Eingriff an der Platte. Die im Eingriff befindlichen Führungen verhalten sich während des Transportvorgangs wie parallel geschaltete Federn.

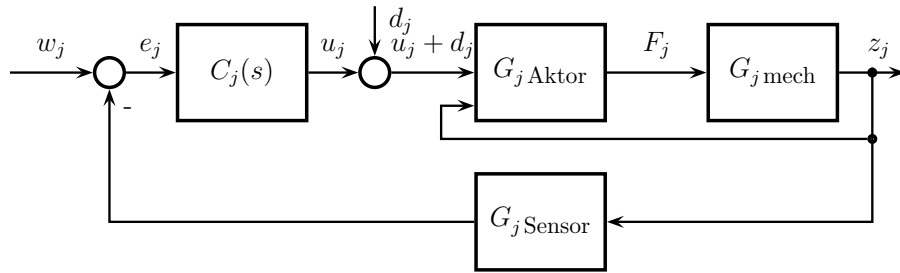


Abbildung 5.1: Blockschaltbild des Regelkreises für einen Lagerfreiheitsgrad

5.1.1 Beschreibung des Transportvorgangs

Zur stabilen Lagerung der Platte, bei einer Bewegung des Schwerpunktes über die Distanz Δx in Abbildung 5.2, müssen mindestens vier Führungen im Eingriff sein. Diese Anzahl ist notwendig, da die elektromagnetischen Aktoren der Führung nur anziehende Kräfte aufbringen können. Bei weniger als vier Führungen kommt es zu Lagerungszuständen, in denen der Schwerpunkt ein Moment erzeugt, welches nicht mehr ausgegelt werden kann.

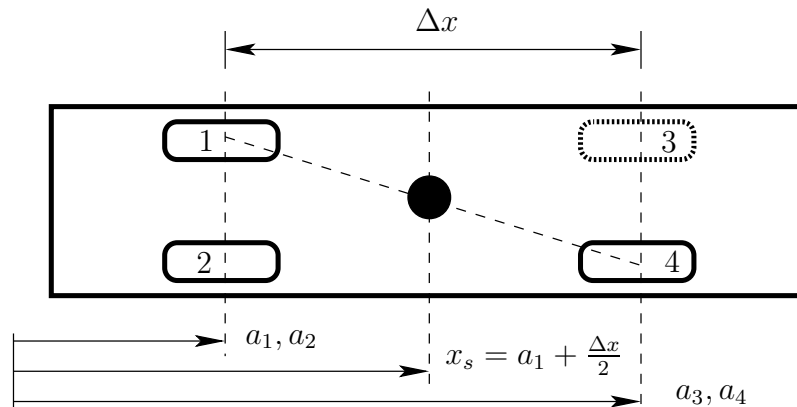


Abbildung 5.2: Draufsicht der Platte mit vier Führungen

Als Beispiel für dieses Verhalten ist die Lagerung der Platte mit drei aktiven Führungen (eins, zwei, vier), in Abbildung 5.2 als Draufsicht, dargestellt. Der nutzbare Transportweg reduziert sich dabei auf die Distanz $\Delta x/2$. Überfährt der Schwerpunkt der Platte die Diagonale zwischen den Führungen eins und vier, entsteht durch den Hebelarm des Schwerpunktes zur Diagonalen ein Moment, das durch den einseitig wirkenden Aktor in Führung zwei nicht ausgegelt werden kann. Das System ist für die Regelung nicht mehr beherrschbar. Mit der Hinzunahme von Führung drei wird dieser Lagerungszu-

stand stabil. Der gesamte Transportweg Δx kann genutzt werden. Der gleiche Effekt, wie gerade beschrieben, entsteht wenn der Schwerpunkt die senkrechte Linie zwischen den Führungen drei und vier überfährt. Daher müssen zur Stabilisierung dieses Lagerungszustandes weitere Führungen im Abstand Δx zu den Führungen drei und vier angebracht werden.

Ein kompletter Transportvorgang, über die Distanz von $2\Delta x$, ist in der Abbildung 5.3 als Seitenansicht mit unterschiedlichen Positionen der Platte dargestellt. Die Platte wird durch die schwarze Linie mit dem gefüllten Kreis als Schwerpunkt symbolisiert. Die grauen Umrandungen dienen der Abgrenzung unterschiedlicher Lagerungszustände, während der Transportbewegung. Der mechanische Aufbau des System ist als ebenes Problem gezeigt, da dieser spiegelsymmetrisch zur Transportrichtung ist. Dies bedeutet, dass die Führungen zwei, vier und sechs in x Richtung an den gleichen Positionen liegen wie die Führungen eins, drei und fünf und mit den gleichen Kräften belastet werden. Die absoluten Positionen der Führungen in x Richtung, werden durch die Größen a_1, a_3, a_5 beschrieben. Die Position des Schwerpunktes wird durch die Variable x_s ausgedrückt. Die zur Führung der Platte benötigten Kräfte werden durch die elektromagnetischen Aktoren der Führungen erzeugt. Diese haben, wie in Abschnitt 5.1 beschrieben das Verhalten einer Feder und werden daher in der Abbildung 5.3 durch eine solche symbolisiert.

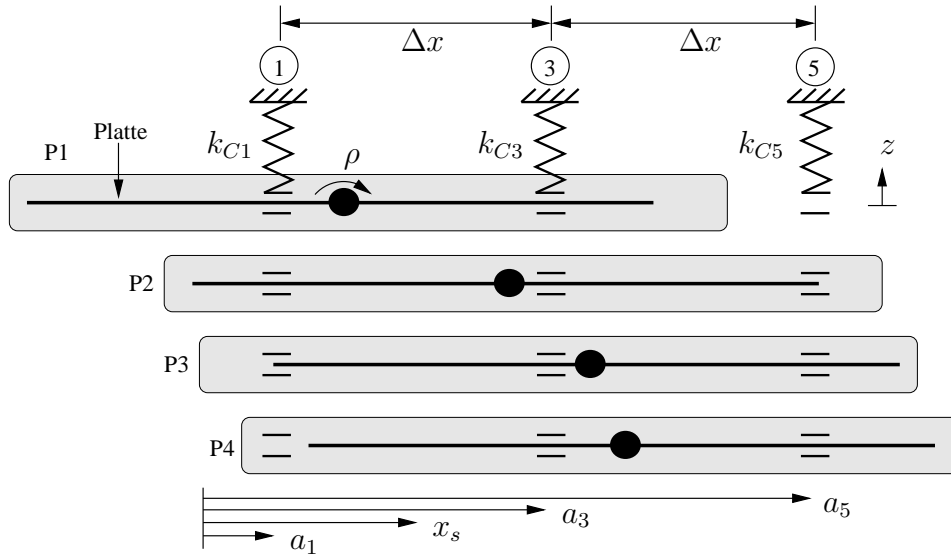


Abbildung 5.3: Darstellung des Transportvorgangs für unterschiedliche Positionen der Platte

Der Transportvorgang beginnt mit Position P1 in Abbildung 5.3. In diesem wird die Platte von vier Führungen (eins, zwei, drei und vier) getragen. Ab Position P2 fährt die Platte in die Führungen fünf und sechs ein und wird ab dieser Position von sechs Führungen getragen. Durch die sechsfache Lagerung kann der Schwerpunkt der Platte Führung drei und vier passieren, ohne dass das System instabil wird. Es stellt sich

Position P3 ein. Ab dieser fährt die Platte aus den Führung eins und zwei heraus und wird ab Position P4 durch die vier Führungen drei, vier, fünf und sechs gelagert. Die Position P4, ist vom Zustand der Lagerung betrachtet, identisch mit P1. Ab hier beginnt der Transportvorgang wieder wie beschrieben. Durch den Übergabevorgang ergeben sich zwei unterschiedliche Zustände mit einer überbestimmten Lagerung, die durch die sich im Eingriff befindlichen Führungen unterschieden werden. Zustand A mit vier aktiven Führungen und Zustand B mit sechs aktiven Führungen.

Maximaler Abstand zwischen den Führungen

Die minimale Anzahl an Führungen für den stabilen Transport über die Distanz $2\Delta x$ beträgt sechs. Der mit dieser Anzahl maximal nutzbare Abstand Δx_{\max} , zwischen den Führungen, setzt sich aus der Länge der Platte L_P , der Länge L_A einer halben Führung und einer Länge L_S , die die Überlappung der Platte über den Sensoren beschreibt, zusammen. Die Länge L_S wird für das in diesem Kapitel vorgestellte Regelungsverfahren benötigt, um sicherzustellen, dass bei der Einfahrt der Platte in eine Führung der Sensor überdeckt ist und ein plausibles Signal liefert, bevor die Aktoren eingeschaltet werden. Die genannten Längen sind in der Abbildung 5.4 dargestellt.

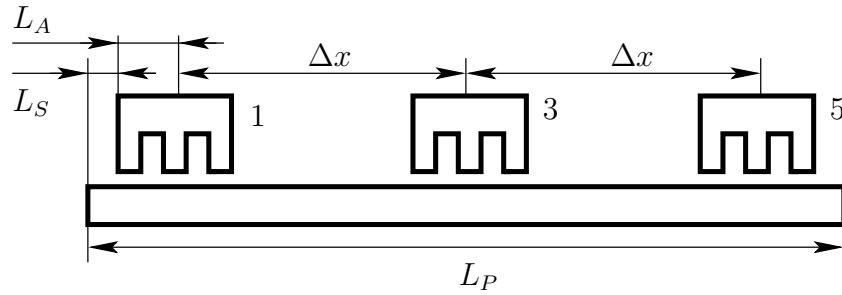


Abbildung 5.4: Maximal möglicher Aktorabstand

Aus der Abbildung 5.4 leitet sich die Gleichung (5.1) für Δx_{\max} ab.

$$\Delta x_{\max} = \frac{L_P - 2(L_S + L_A)}{2} \quad (5.1)$$

Mit den Werten aus Tabelle 5.1 und der Gleichung (5.1) ergibt sich ein Δx_{\max} von 0,390 Metern. Dieser Abstand, wird für alle in dieser Arbeit erstellten Ergebnisse aus Berechnungen der Simulation und der experimentellen Untersuchungen am Prüfstand, als Abstand zwischen den Führungen, genutzt.

Tabelle 5.1: Längen am Prüfstand

Länge	Wert
L_P	1,000 Meter
L_A	0,065 Meter
L_S	0,045 Meter

5.1.2 Einfluss der überbestimmten Lagerung auf die Reglerstruktur

Die einzelnen Regler $C_j(s)$ bestehen in ihrer Struktur aus einem proportionalen und einem differentiellen Anteil. Dies bedeutet, dass immer eine bleibende Regelabweichung vorhanden ist. Diese wird benötigt, um über den proportionalen Anteil die notwendige Haltekraft zur Kompensation der Gewichtskraft zu erzeugen. Soll die bleibende Regelabweichung zu null geregelt werden, so müsste ein integrierender Anteil im Regler vorhanden sein. Dieser könnte die notwendige Haltekraft erzeugen, ohne dass eine bleibende Regelabweichung vorhanden ist.

In den Zuständen A und B des Systems kommt es während des Transportvorgangs zu überbestimmten Lagerungszuständen, wie z.B. in Abbildung 5.5 für den Zustand B dargestellt. Hierbei greifen sechs Führungen an der Platte an, obwohl vier zur Lagerung ausreichen würden.

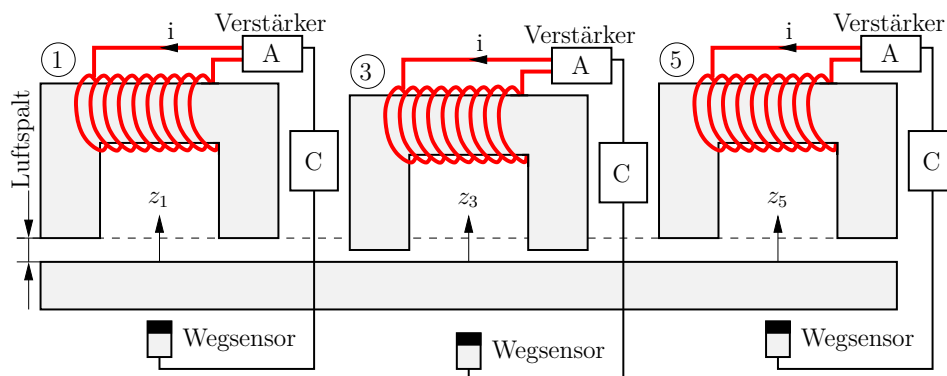


Abbildung 5.5: Überbestimmter Lagerungszustand

Durch Montagefehler kann es zu unterschiedlichen Höhen der einzelnen Führungen kommen. Dargestellt ist ein solcher Montagefehler in Abbildung 5.5, in dem die Führung drei zu niedrig montiert ist. Genauso könnte der Montagefehler auch in die entgegengesetzte Richtung auftreten. Durch diese fehlerhafte Montage wird die zu regelnde Auslenkung

z_3 falsch erfasst, obwohl sich die Platte für die beiden äußeren Führungen an der Sollposition befindet. Durch die Fehlstellung an Führung drei, würde durch den integrierenden Anteil im Regler die Verteilung der Traglasten auf die einzelnen Führungen nicht mehr, wie bei parallel geschalteten Federn, gleichmäßig verteilt werden, sondern von der Größe des Integrals, dass über die Zeit durch den bleibenden Fehler anwächst, abhängen. Dadurch können Lagerungszustände entstehen, in denen die Führung drei keinen Anteil an der Traglast übernimmt und die Platte bei der Transportbewegung in die Fanglager fällt. Ebenso ist es möglich, dass die Führung drei eine so hohe Last aufnimmt, dass sich ein labiles Gleichgewicht an der Platte einstellt. Aus diesem Grund ist es für das beschriebene System von Vorteil, auf einen integrierenden Anteil im Regler zu verzichten, um eine stabile Lagerung zu gewährleisten.

5.1.3 Verlauf der Trajektorie des Schwerpunktes der Platte

Eine wichtige Größe zur Beurteilung der Güte des Transportvorgangs, sind die Verläufe der Schwerpunktskoordinaten ρ und z_s in Abhängigkeit von der Transportbewegung. Die Kombination beider Auslenkungen bildet die Trajektorie des Schwerpunktes in Abhängigkeit von der Transportbewegung. Die Koordinate φ wird im weiteren nicht betrachtet, da diese durch den symmetrischen Aufbau unabhängig von der Transportbewegung ist. Durch Simulationen mit dem erstellten Modell und durch Messungen am Prüfstand unter Verwendung des dezentralen Regelungskonzeptes lassen sich die Auslenkungen der beiden Schwerpunktsfreiheitsgrade ρ und z_s für einen Transportvorgang über die Strecke $2 \times \Delta x$ bestimmen. Aus diesen Ergebnissen kann ein qualitativer Verlauf der Trajektorie berechnet werden. In Abbildung 5.6 ist der qualitative Verlauf einer Trajektorie dargestellt. Die verschiedenen Positionen x_s des Rechtecks symbolisieren unterschiedliche Positionen des Schwerpunktes der Platte im Verlauf eines Transportvorgangs. Die Neigung zur Horizontalen gibt den Winkel der Platte an den unterschiedlichen Positionen x_s wieder.

Besonders auffällig im Verlauf der Trajektorie sind die Unterschiede der Koordinate z_s zwischen den einzelnen Zuständen. Bei einem Zustandswechsel kommt es zu einer sprunghaften Änderung der Höhenkoordinate z_s . Ebenso ändert sich der Winkel der Platte sprunghaft infolge des Zustandswechsels. Beides führt zu einem ruckartigen Transportvorgang, der sich negativ auf das Transportgut und die Stabilität des Systems auswirken kann. Innerhalb eines Zustandes ist der Verlauf ebenfalls nicht konstant, wobei im Gegensatz zu einem Zustandswechsel, dieser kontinuierlich verläuft. Dies betrifft sowohl die Koordinate ρ , wie auch die Koordinate z_s . Hierdurch durchläuft die Platte eine wellenförmige Bewegung. Im Folgenden wird beschrieben, von welchen Einflüssen der Verlauf der Trajektorie abhängt und welche Erkenntnisse sich daraus ableiten lassen, um den Verlauf der Trajektorie durch die elektromagnetischen Aktoren beeinflussen zu können.

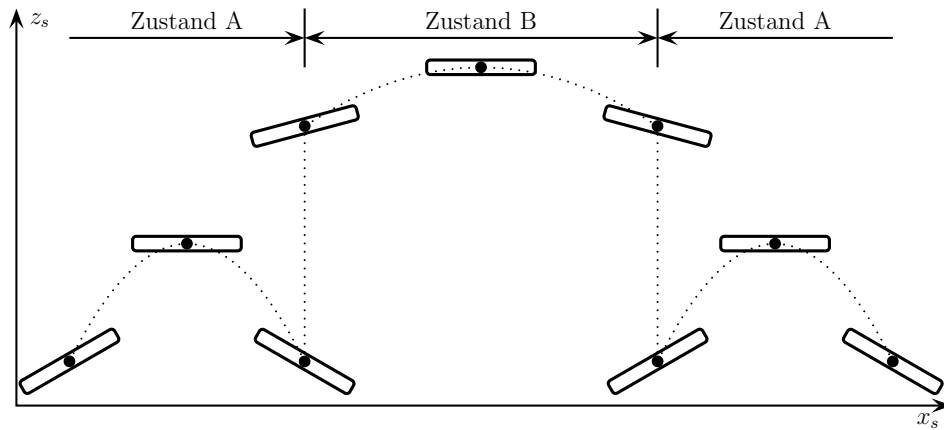


Abbildung 5.6: Verlauf der Trajektorie des Schwerpunktes

5.2 Systemverhalten und Eigenschaften

Die Eigenschaften des Systems beschreiben das Systemverhalten. Für die aktive Beeinflussung des Systemverhaltens ist es notwendig, die Abhängigkeiten der Eigenschaften von den sich ändernden Einflüssen zu kennen. Das verbindende Glied zwischen Eigenschaften und Einflüssen sind die Regelkreise der einzelnen Führungen. Im folgenden wird definiert, welche Größen des Systems Einflüsse sind und welche Eigenschaften das System besitzt. Darauf aufbauend werden die Wirkmechanismen der einzelnen Einflüsse diskutiert. Nachdem die Einflüsse bekannt sind, werden die Eigenschaften beschrieben und deren Abhängigkeiten von den Einflüssen.

Einflüsse

Die Einflüsse auf das Systemverhalten sind

- die unterschiedliche Anzahl an aktiven Führungen in den einzelnen Zuständen,
- die Lastverteilung vom Schwerpunkt der Platte auf die einzelnen Führungen,
- die sich nichtlinear verhaltenden elektromagnetischen Aktoren der einzelnen Führungen
- und die Abstände des Schwerpunktes von den Führungen.

Durch die Transportbewegung verändern sich die Einflüsse in ihrer Größe und Struktur und verändern damit das Systemverhalten.

Eigenschaften

Die Eigenschaften beschreiben das physikalische Verhalten des Systems hinsichtlich seiner Stabilität und der entstehenden Trajektorie. Als Eigenschaften, die einen Hinweis auf die Stabilität des Systems geben, werden die Steifigkeiten k_φ , k_ρ und k_z der Freiheitsgrade des Schwerpunktes betrachtet. Aus den Steifigkeiten und den Trägheiten des Systems bilden sich die Frequenzen ω_φ , ω_ρ und ω_z der Starrkörpermoden. Die Lage der Frequenzen dieser Moden bezüglich der Dynamik der elektromagnetischen Aktoren gibt einen Hinweis auf die Stabilität des Systems. Die Verläufe der Auslenkungen z_s und ρ des Schwerpunktes der Platte mit ihrer Abhängigkeit von der Transportbewegung werden als Eigenschaften des Systems definiert, da diese den charakteristischen Verlauf der Trajektorie bilden.

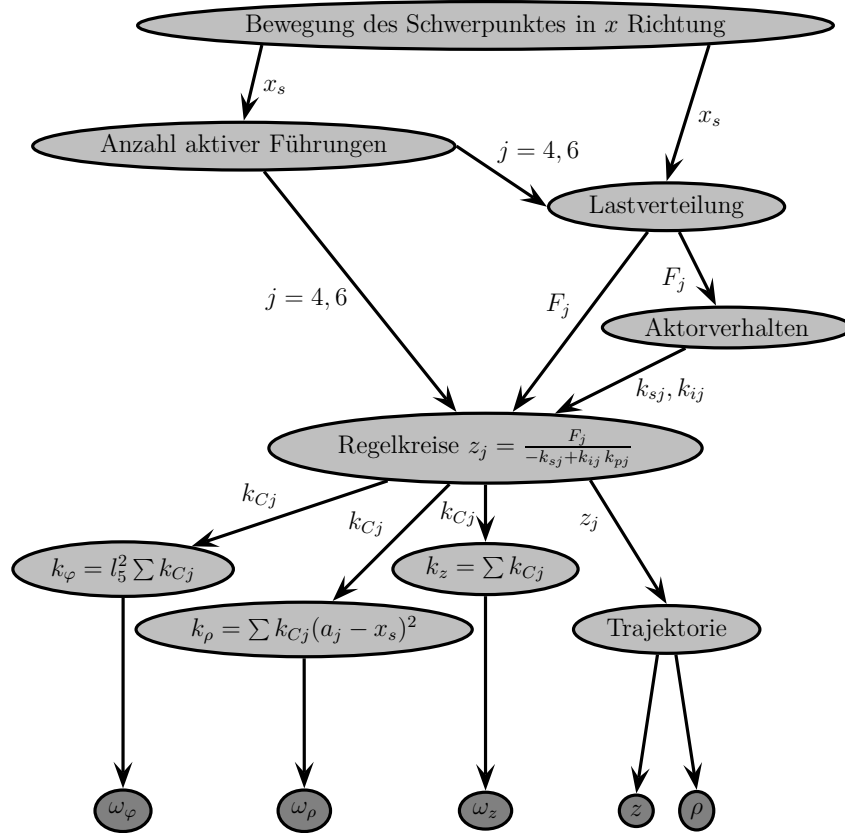


Abbildung 5.7: Einfluss der Transportbewegung auf die Eigenschaften des Systems

In Abbildung 5.7 sind die Eigenschaften mit ihren Abhängigkeiten von den Einflüssen dargestellt. Die Abbildung macht deutlich, dass nicht die direkte Wirkung der Einflüsse die Eigenschaften ändert, sondern durch die Einflüsse die Regelkreise als zentrale Verbindungsstelle.

dungselemente beeinflusst werden und ihr Verhalten ändern. Durch diese Veränderung werden die Eigenschaften beeinflusst.

5.2.1 Einfluss der Anzahl aktiver Führungen

Die Anzahl aktiver Führungen variiert, während der Transportbewegung, mit der Änderung des Zustandes. Hierdurch wird die Lastverteilung auf die einzelnen Führungen sprunghaft geändert, da sich die gleichbleibende Last auf einer unterschiedlichen Anzahl an Führungen abstützt. Weiterhin wird durch diesen Einfluss die Anzahl der Regelkreise bei einem Zustandswechsel variiert, was die Summe der Steifigkeiten sprunghaft ändert. Hieraus resultiert der sprunghafte Verlauf der Trajektorie in Abbildung 5.6.

5.2.2 Einfluss der Lastverteilung

Während des Transportvorgangs der Platte müssen von den Führungen unterschiedlich große Kräfte zur Lagerung aufgebracht werden. Die Summe dieser Kräfte steht im Gleichgewicht mit der Gewichtskraft der Platte. Wie aus Abbildung 5.7 zu sehen, wird die Verteilung der Last auf die einzelnen Führungen durch die Anzahl der Führungen und durch die sich einstellenden Abstände zwischen dem Schwerpunkt der Platte und den Führungen beeinflusst. Für die statische Ruhelage, an jeder Position der Platte, können die notwendigen Kräfte berechnet werden. Für den Zustand A mit vier aktiven Führungen, wobei zwei Führungen identisch sind und somit nur zwei Kräfte berechnet werden müssen, reichen zur Berechnung die Gleichgewichtsbedingungen für ein ebenes System aus. Für Zustand B mit sechs aktiven Führungen, von denen drei identisch sind und drei Kräfte berechnet werden, reichen die Gleichgewichtsbedingungen nicht aus, um das Gleichungssystem zu lösen. Hierbei handelt es sich um ein statisch überbestimmtes System. Es werden zusätzliche Bedingungen aus der Elastostatik und der Geometrie des Systems benötigt. Mit diesen Voraussetzungen lassen sich die Kraftverläufe des Systems für alle Positionen x_s des Schwerpunktes der Platte berechnen. In Abbildung 5.8 sind die Verläufe der Kräfte, normiert auf die Gewichtskraft F_G der Platte, dargestellt.

Befindet sich das System in Zustand A oder B, so ist der Verlauf der Kräfte von den Änderungen der Abstände $a_j - x_s$ abhängig. Es entsteht ein kontinuierlicher Verlauf, bei dem die Kraft von Führung eins mit sich entfernendem Schwerpunkt kleiner wird und die Kraft der Führung drei zunimmt. Steht der Schwerpunkt, innerhalb eines Zustandes, mittig zwischen den Aktoren, so sind die Kräfte für alle Aktoren gleich groß. Dies ist in den Scheitelpunkten der einzelnen Zustände der Fall. Bei einem Wechsel des Zustandes springt das Niveau der Kräfte aufgrund der sich ändernden Anzahl an aktiven Führungen die an der Platte angreifen.

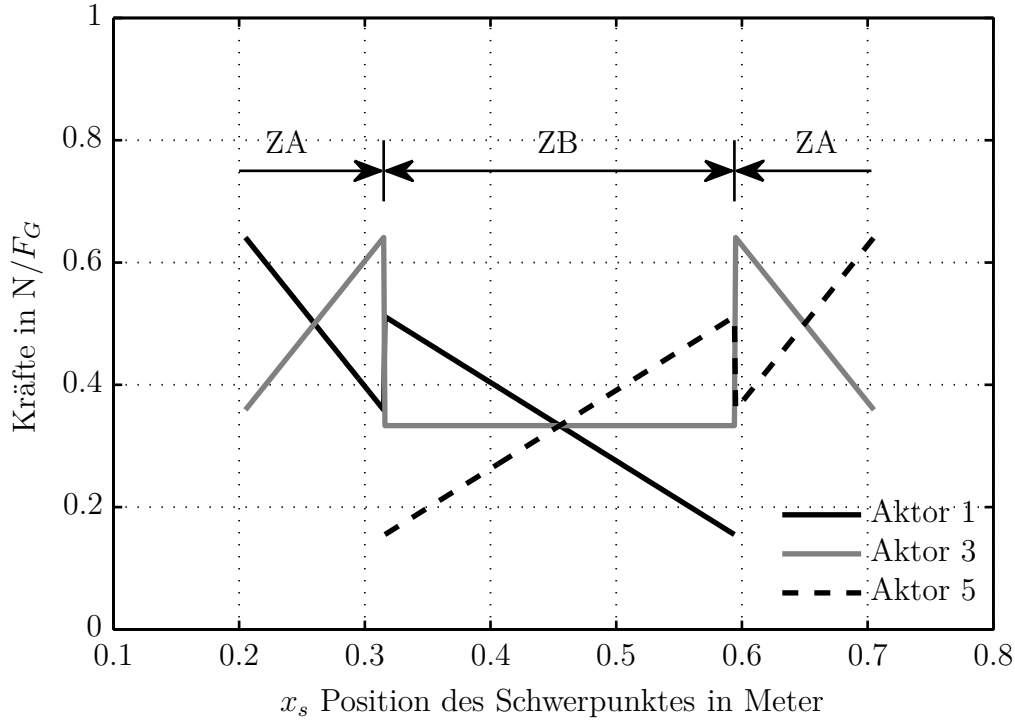


Abbildung 5.8: Verlauf der Lagerkräfte

5.2.3 Einfluss der nichtlinearen Aktoren

Die elektromagnetischen Aktoren wirken im geschlossenen Regelkreis wie Feder–Dämpferelemente auf die freie Platte. Die entstehende Steifigkeit k_C , eines elektromagnetischen Aktors, hängt von dem proportionalen Verstärkungsfaktor des Reglers und denen am Arbeitspunkt bestimmten Parametern k_i und k_s des Aktors ab. Dieser Zusammenhang ist in Gleichung 5.2 dargestellt.

$$k_C = -k_s + k_i k_p \quad (5.2)$$

Durch die sich bei der Transportbewegung ändernde Lastverteilung, ändern sich die Kräfte der Aktoren. Da die Kraft und der Luftspalt den Arbeitspunkt eines Aktors definiert und die Kennlinien für den Kraft–Strom–Weg Zusammenhang nichtlinear verlaufen, ändern sich die Parameter k_i und k_s des Aktors. Durch diese Beeinflussung ändert sich, wie aus Gleichung (5.2) ersichtlich, die resultierende Steifigkeit k_C . Hierdurch werden alle Eigenschaften des Systems beeinflusst. Allerdings ist der Einfluss deutlich geringer als der, den die Lastverteilung und die Änderung des Zustandes haben. Deutlich zu erkennen wird der Einfluss erst bei großen Werten für die Proportionalitätskonstanten k_p

der Regler, da dann das Produkt aus $k_i k_p$ an Einfluss gewinnt. Zur Berechnung der Parameter k_i und k_s wird das in Abschnitt 4.2 beschriebene und aus Messdaten gewonnene Polynom 4.16 benutzt. Mit diesem werden um die Arbeitspunkte der einzelnen Aktoren die Magnetkräfte berechnet und daraus die Steigungen im Arbeitspunkt bestimmt.

5.2.4 Verlauf der Eigenschaften bei der Transportbewegung

Im Folgenden werden die Verläufe der Eigenschaften, die in Abschnitt 5.2 aufgezählt sind, näher erläutert und deren Abhängigkeit von der Transportbewegung dargestellt.

Verlauf der Steifigkeiten

Die Gesamtsteifigkeiten der Freiheitsgrade des Schwerpunktes hängen von den in Abbildung 5.7 dargestellten Einflüssen ab. Mathematisch lassen sich diese Abhängigkeiten durch die Gleichungen (5.3), (5.4) und (5.5) ausdrücken. Mittels der mathematischen Beschreibungen können die Verläufe der Steifigkeiten in Abhängigkeit von der Schwerpunktskoordinate x_s darstellt werden, wobei x_s auf die Eigenschaften k_φ und k_z indirekt über die Anzahl aktiver Führungen j und die Änderung der Parameter k_{ij} und k_{sj} der Aktoren wirkt.

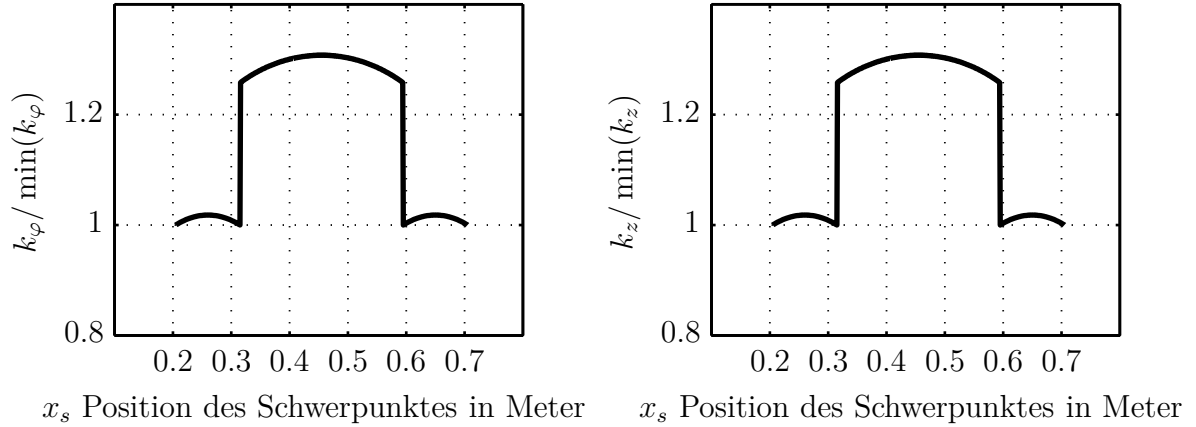
$$k_\varphi(x_s) = \sum_{j=1}^{n=4,6} l_5^2 (-k_{sj} + k_{ij} k_{pj}) \quad (5.3)$$

$$k_\rho(x_s) = \sum_{j=1}^{n=4,6} (-k_{sj} + k_{ij} k_{pj}) (a_j - x_s)^2 \quad (5.4)$$

$$k_z(x_s) = \sum_{j=1}^{n=4,6} (-k_{sj} + k_{ij} k_{pj}) \quad (5.5)$$

Für die beiden Steifigkeiten k_φ und k_z aus Abbildung 5.9, ergeben sich ähnliche Verläufe. Für die Darstellung sind die Verläufe auf die jeweils kleinste auftretende Steifigkeit normiert, um vergleichen zu können, welche Steifigkeit die größte Änderung erfährt.

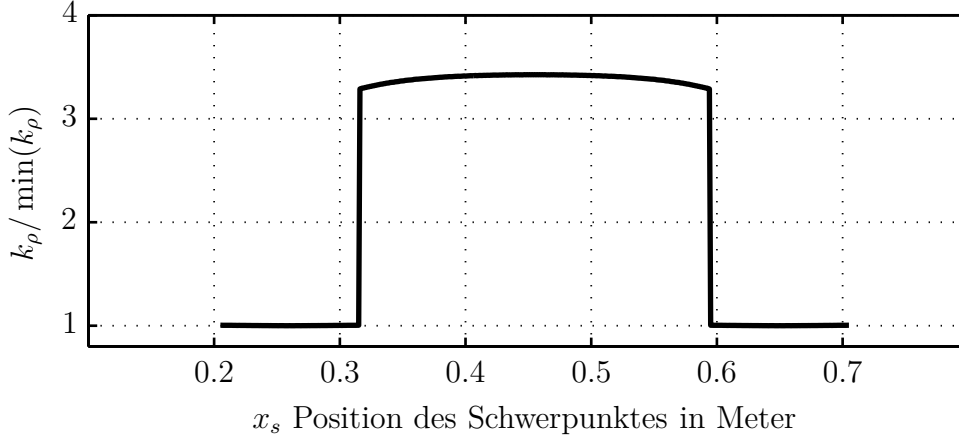
Deutlich zu erkennen ist in den Darstellungen der Steifigkeiten der Niveauunterschied zwischen Zustand A und B, verursacht durch die unterschiedliche Anzahl an Führungen. In den Diagrammen ist ein nicht konstanter Verlauf innerhalb der Zustände zu erkennen. Dieser entsteht durch die sich ändernden Arbeitspunkte der Aktoren. Im Verhältnis ist die Änderung der Steifigkeit aufgrund des nichtlinearen Aktorverhaltens klein gegenüber dem Einfluss der Anzahl der Führungen. Erst bei sehr großen Werten für k_{pj} der Reg-


 Abbildung 5.9: Verläufe der Steifigkeiten $k_\varphi(x_s)$ und $k_z(x_s)$

ler, nimmt der Einfluss im Verhältnis stark zu. Von der Größenordnung der Änderung betrachtet, ändern sich beide Steifigkeiten im gleichen Verhältnis.

Der Verlauf der Steifigkeit k_ρ aus Gleichung (5.4) stellt sich etwas anders da, als die beiden vorher diskutierten Steifigkeiten. Hier kommt zu den Einflüssen der Anzahl der Aktoren und des nichtlinearen Aktorverhaltens, der Einfluss der Hebelarme zwischen den aktiven Führungen und dem Schwerpunkt der Platte über das Quadrat der Summe aus $(a_j - x_s)^2$ hinzu. Der Verlauf stellt sich wie in Abbildung 5.10 gezeigt dar. Prinzipiell ist auch hier der deutliche Niveauunterschied zwischen den Zuständen des Systems erkennbar. Was allerdings fehlt, sind die ausgeprägten Änderungen der Verläufe innerhalb der Zustände, im Vergleich zu den Steifigkeiten k_φ und k_z . Dies rührt daher, dass der Einfluss der Hebelarme und der Einfluss des nichtlinearen Aktorverhaltens gegenläufig ist und sich so zu einem Teil aufhebt. Mit größer werdenden Werten für k_{pj} der Regler, nimmt der Einfluss des nichtlinearen Aktorverhaltens zu. Betrachtet man die Änderung der Steifigkeit im Verhältnis zu den Änderungen der Steifigkeiten k_φ und k_z , so ist die Änderung bei k_ρ wesentlich größer. Ursache sind die im Vergleich zu den beiden anderen Steifigkeiten wesentlich größeren Hebelarme.

Aus den gezeigten Steifigkeiten und den Trägheitsmomenten der Platte aus Tabelle 4.1 lassen sich die Werte für die Starrkörpermoden der Freiheitsgrade des Schwerpunktes nach den Gleichungen (5.6), (5.7) und (5.8) berechnen. Diese sind abhängig von der Geometrie und Masseverteilung der Platte und gelten damit nur für diesen Aufbau.


 Abbildung 5.10: Verlauf der Steifigkeit $k_\rho(x_s)$

$$\omega_\varphi(x_s) = \sqrt{\frac{k_\varphi(x_s)}{\theta_\varphi}} \quad (5.6)$$

$$\omega_\rho(x_s) = \sqrt{\frac{k_\rho(x_s)}{\theta_\rho}} \quad (5.7)$$

$$\omega_z(x_s) = \sqrt{\frac{k_z(x_s)}{m_z}} \quad (5.8)$$

In Abbildung 5.11 sind die Verläufe der drei Starrkörpermoden nach den Gleichungen (5.6), (5.7) und (5.8) dargestellt, wobei die Verläufe auf die kleinste auftretende Frequenz von ω_ρ normiert sind.

Die Frequenz für den Freiheitsgrad φ ist die höchste im System vorkommende. Mit steigenden Proportionalanteilen der Regler und maximal erreichbarer Dämpfung, die zum einen vom Messrauschen und zum anderen von der Dynamik der Aktoren abhängt, wird diese Starrkörpermode als erste instabil. Damit gibt diese Mode die maximal erreichbare Dynamik des Systems vor. Allerdings ist die relative Änderung der Frequenz im Verhältnis zu der Änderung von ω_ρ klein. Diese ist aufgrund des großen Steifigkeitsprungs stark ausgeprägt und kommt im Zustand B nahe an die Frequenz ω_φ heran. Am unkritischsten für die Regelung ist der Verlauf der Frequenz ω_z . Die Änderung beim Zustandswechsel ist im Verhältnis klein und liegt weit von den Maximalfrequenzen der beiden anderen Freiheitsgrade entfernt. Die Änderung in Abhängigkeit von der Transportbewegung dieser Eigenschaft ist in [10] durch Messungen an einem Prototypen für ein magnetisch schwebendes Transportsystem nachgewiesen worden.

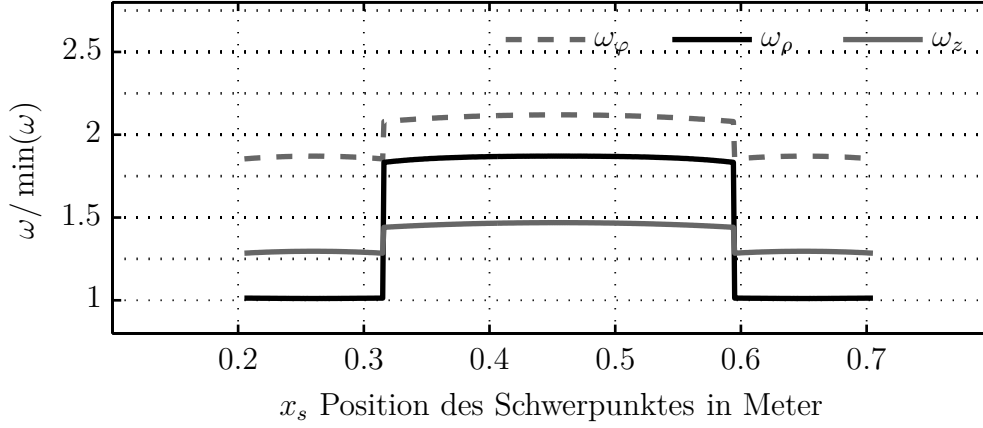


Abbildung 5.11: Verlauf der Eigenfrequenzen der Starrkörpermoden

Auslenkungen ρ , z_s und die entstehende Trajektorie

Die Trajektorie des Schwerpunktes, aus Abbildung 5.6 entlang des Transportweges, entsteht aus den Auslenkungen der zwei Freiheitsgrade des Schwerpunktes ρ und z_s . Die Koordinate φ wird aufgrund des symmetrischen Aufbaus des Systems von der Transportbewegung nicht beeinflusst. ρ und z_s hängen wie in Abschnitt 4.1.1 beschrieben, über die Transformation \mathbf{T}_q aus Gleichung (4.3) mit den Auslenkungen z_j an den Führungen zusammen. Wie in Abbildung 5.7 dargestellt spiegeln die Auslenkungen z_j das Verhalten der Regelkreise wieder.

Die an einer Führung entstehende statische Auslenkung z_j entspricht dem Verhältnis aus der an der jeweiligen magnetischen Führung j wirkenden Lagerkraft F_j und der resultierenden Steifigkeit k_{Cj} . Dieser Zusammenhang ist in Gleichung 5.9 dargestellt, wobei direkt die Beziehung aus Gleichung 5.2 für den Zusammenhang der Steifigkeit k_{Cj} in Abhängigkeit von den Parametern des Reglers und dem Arbeitspunkt der Aktoren, mitberücksichtigt wird.

$$z_j = \frac{F_j}{-k_{sj} + k_{ij} k_{pj}} \quad (5.9)$$

Es wird ersichtlich, dass alle drei Einflüsse eine Wirkung auf die Trajektorie haben. Die unterschiedlichen Zustände ändern die Anzahl j der Regelkreise, was die Gesamtsteifigkeiten der Schwerpunktsfreiheitsgrade ändert. Durch die unterschiedlichen Lastverteilungen variiert die Kraft F_j und durch das nichtlineare Aktorverhalten wird die Steifigkeit k_{Cj} beeinflusst. Beispielfhaft lassen sich für den Zustand A die Abhängigkeiten der Auslenkung z_s und ρ durch die Gleichung (5.10) und (5.11) beschreiben. Bei genauer

Betrachtung der Gleichung fällt die quadratische Abhängigkeit von der Schwerpunktskoordinate x_s im dritten Term der Gleichung (5.10) auf. Dieser ist für den parabelförmigen Verlauf der Trajektorie verantwortlich.

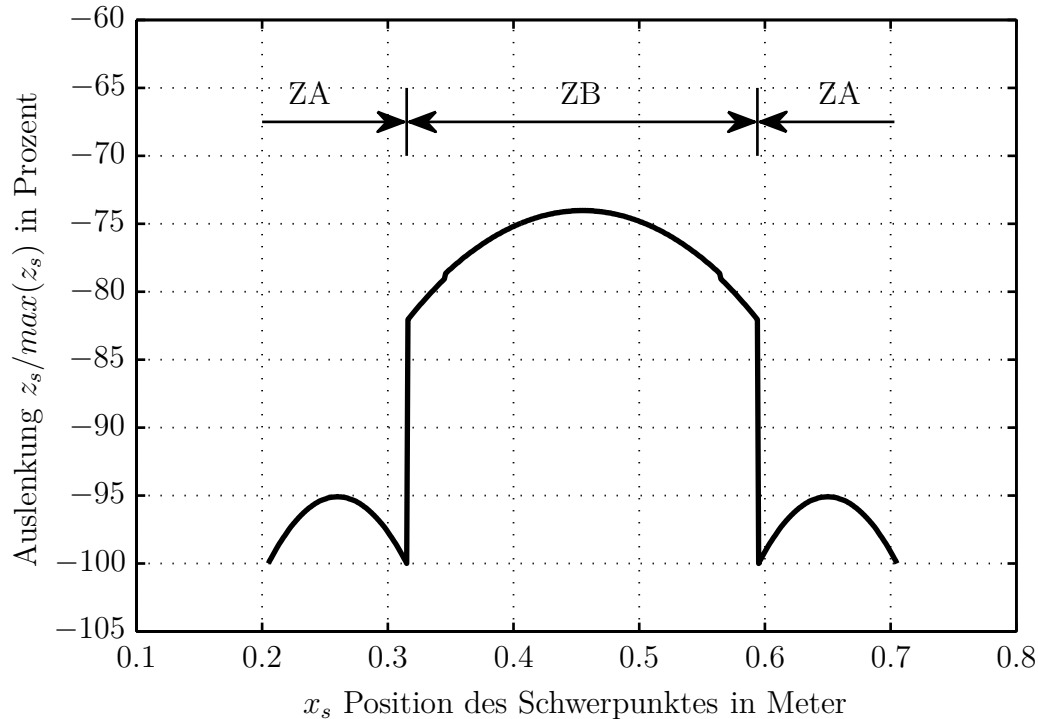
$$z_{sA} = -\frac{(a_1^2 k_{C1} + a_3^2 k_{C3}) F_G}{(a_1 - a_3)^2 k_{C1} k_{C3}} - \frac{(-2 a_1 k_{C1} - 2 a_3 k_{C3}) F_G}{(a_1 - a_3)^2 k_{C1} k_{C3}} x_s - \frac{(k_{C1} + k_{C3}) F_G}{(a_1 - a_3)^2 k_{C1} k_{C3}} x_s^2 \quad (5.10)$$

$$\rho_A = \frac{(-a_1 k_{C1} - a_3 k_{C3}) F_G}{(a_1 - a_3)^2 k_{C1} k_{C3}} - \frac{(k_{C1} + k_{C3}) F_G}{(a_1 - a_3)^2 k_{C1} k_{C3}} x_s \quad (5.11)$$

In Abbildung 5.12 ist der Verlauf der Auslenkung des Freiheitsgrades z_s des Schwerpunktes in Abhängigkeit von dessen Position x_s dargestellt. Der Verlauf ist auf die maximal auftretende Auslenkung normiert. Deutlich zu erkennen ist bei einem Zustandswechsel der Einfluss der unterschiedlichen Anzahl an Führungen. Im Bereich des Zustandes B mit sechs aktiven Führungen ist die statische Auslenkung wesentlich geringer als im Zustand A. Der nichtlineare bogenförmige Verlauf innerhalb der Zustände ist zum einen auf die quadratische Abhängigkeit von x_s zurückzuführen, wie in Gleichung (5.10) gezeigt und zum anderen auf das sich ändernde nichtlineare Aktorverhalten. Auch hier wird deutlich, dass der Einfluss der sich ändernden Lastverteilung wesentlich größer ist, als der der sich ändernden Steifigkeit.

In Abbildung 5.13 ist der auf den maximal auftretenden Wert ρ normierte Verlauf des Winkels ρ in Abhängigkeit von der Position x_s des Schwerpunktes der Platte dargestellt. Die Abhängigkeiten sind identisch mit denen des Freiheitsgrades z_s , da sowohl z_s als auch ρ aus den Auslenkungen z_i der einzelnen Führungen entstehen. Auffällig im Verlauf sind zum einen die unterschiedlichen Steigungen in den Zuständen A und B, die durch die unterschiedliche Anzahl an Führungen entstehen und zum anderen der Vorzeichenwechsel im Verlauf, bei einem Wechsel des Zustandes. Dieser kann den Transportvorgang stören, da die Platte hierdurch einen Stoß erfährt, der das System bei nicht ausreichender Dämpfung zum Schwingen anregen kann.

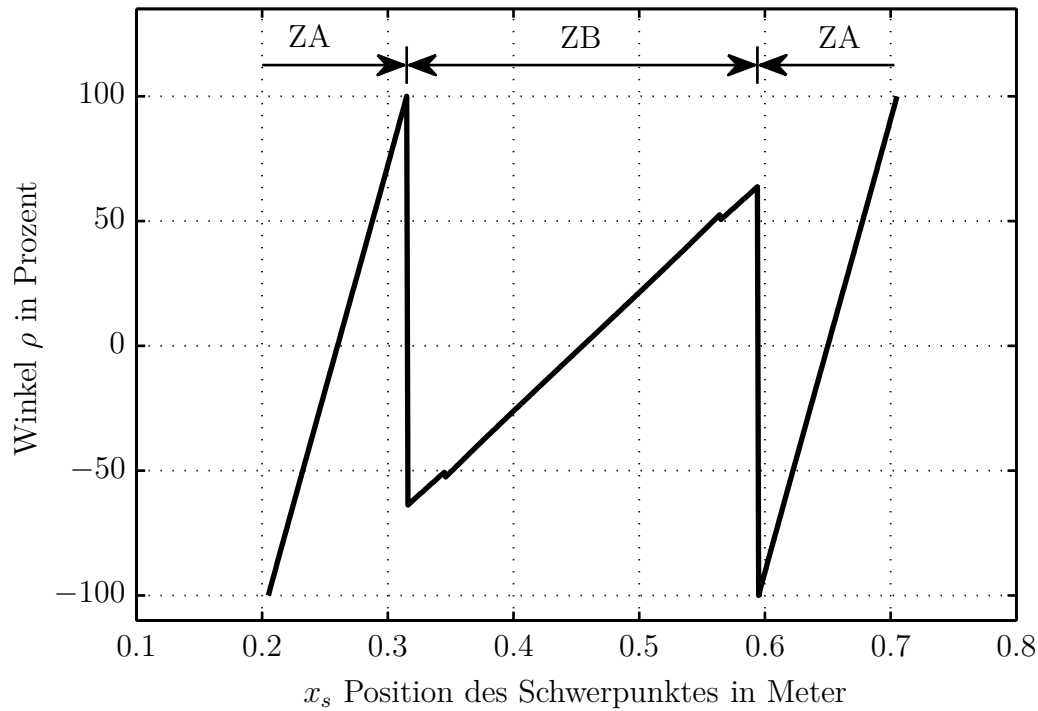
Aus den beiden gezeigten Verläufen für die Freiheitsgrade ρ und z ergibt sich für den Transportvorgang die Trajektorie der Platte aus Abbildung 5.6. Die Platte bewegt sich während des Transportvorgangs auf und ab und dreht sich dabei um ihren Schwerpunkt.

Abbildung 5.12: Verlauf der Koordinate z_s des Schwerpunktes

Dieser nicht konstante und nicht stetige Verlauf kann einen störenden Einfluss auf einen Bearbeitungsprozess des Transportgutes haben und der Transportvorgang selbst kann hierdurch in seiner Stabilität beeinträchtigt werden. Aus diesem Grund ist es sinnvoll nach einer Möglichkeit zu suchen, diesen Verlauf aktiv beeinflussen zu können, um eine konstante Bewegung zu erreichen und damit die Transportgüter des Systems zu verbessern.

5.3 Beeinflussung des Systemverhaltens

Zur Verbesserung der Güte des Transportvorgangs gilt es, die Auslenkungen der Freiheitsgrade ρ und z_s des Schwerpunktes zu minimieren. Bei der Betrachtung des Diagramms 5.7 wird deutlich, dass die Auslenkungen des Schwerpunktes von den einzelnen Auslenkungen z_j an den Führungen abhängen. Daraus lässt sich ableiten, dass durch eine Beeinflussung der einzelnen Auslenkungen z_j die Auslenkungen des Schwerpunktes minimiert werden können.


 Abbildung 5.13: Verlauf des Winkels ρ des Schwerpunktes

$$z_j = \frac{F_j}{-k_{sj} + k_{ij} k_{pj}} \quad (5.12)$$

Betrachtet man die Abhängigkeiten der Auslenkung z_j in Gleichung (5.12) wird deutlich, dass mittels des aktiven Teils des Systems über die Reglerparameter k_{pj} , Einfluss auf die Steifigkeit und damit auf die Auslenkung, genommen werden kann. Um für alle Positionen der Platte konstante Auslenkungen z_j zu erzeugen, müssen die Parameter k_{pj} für jede Position x_s des Schwerpunktes angepasst werden. Dazu bedarf es eines Mechanismus der die Parameter der Regler $C_j(s)$ variiert. Es entsteht ein Regler dessen Verhalten sich mit der Position ändert, um sich dem Systemverhalten anzupassen. Nach [40] wird ein Regler, der veränderbare Parameter und einen Mechanismus besitzt, um diese abhängig vom Systemverhalten zu ändern, *adaptiver Regler* genannt.

An dieser Stelle gibt es in der Literatur unterschiedliche Ansätze wie die Adaption der Parameter erfolgen kann. In [7] und [19] werden unterschiedliche Ansätze für adaptive Regler beschrieben. So zum Beispiel:

- Verfahren, die mittels eines Referenzmodells und des realen Systems ein Fehlersi-

gnal berechnen und danach die Parameter des Reglers anpassen.

- Verfahren, die mittels eines Identifikationsmodells, das aus den Signalen des realen System geschätzt wird und somit das momentane Systemverhalten wiedergibt, die Parameter für den Regler des realen Systems berechnet.
- Verfahren, die mittels Gain Scheduling die Parameter des Reglers verändern. Dabei besitzt das System zwei Rückführungen. Die erste Rückführung führt die zu regelnde Größe des Systems zurück. Über die zweite Rückführung wird eine Hilfsgröße des Systems gemessen und einem Mechanismus zugeführt, der in Abhängigkeit von der Hilfsgröße die Parameter des Reglers anpasst. Dabei kann der Mechanismus zum Verstellen der Parameter eine analytische Funktion sein, die die Zusammenhänge am System mit den Reglerparametern herstellt, oder eine vorher berechnete Wertetabelle, mit der in Abhängigkeit von der Hilfsgröße die Reglerparameter verändert werden können. In Abbildung 5.14 ist das Blockschaltbild eines Regelkreises mit adaptivem Gain Scheduling Verfahren dargestellt. Die an der Strecke gemessene Hilfsgröße steuert die Adaption.

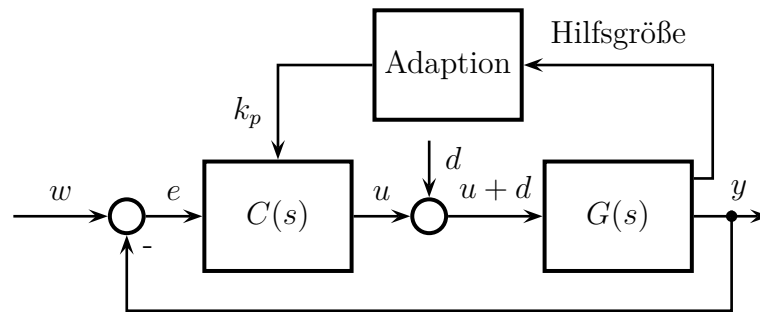


Abbildung 5.14: Blockschaltbild eines Regelkreises mit dem Gain Scheduling Verfahren

Die beiden adaptiven Verfahren mit Referenz- und Identifikationsmodell sind am existierenden Prüfstand nicht umsetzbar, da die auf dem Echtzeitsystem zu Verfügung stehende Rechenleistung nicht ausreicht, um Modelle der benötigten Größenordnung in Echtzeit berechnen zu können. Als Alternative stellt sich eine Lösung mit dem Gain Scheduling Verfahren dar. Dafür muss ein Zusammenhang zwischen dem Systemverhalten und der Hilfsgröße erstellt werden. Als Hilfsgröße bietet sich die gemessene Position des Schwerpunktes an, da dies die grundlegende Ursache für die sich ändernden Einflüsse ist. Durch die Analyse der Abhängigkeiten der Systemeigenschaften aus Abschnitt 5.2.4 sind die Zusammenhänge zwischen Transportbewegung und Auslenkungen bekannt. Aus der Kenntnis dieser Zusammenhänge lässt sich eine Adaptionverfahren entwickeln, das offline ausgeführt, ein Kennfeld berechnet, das über die Hilfsgröße x_s mit den Parametern k_{pj} der Regler verknüpft ist.

5.4 Funktionsweise des Gain Scheduling Verfahrens

Das Ziel, der Anwendung des Gain Scheduling Verfahrens ist, dass Verhalten des Systems aktiv zu beeinflussen. Die Trajektorie der Platte soll über den gesamten Transportvorgang einen konstanten Verlauf aufweisen. Die zu adaptierenden Größen zur Beeinflussung des Verhaltens sind die Parameter k_{pj} der Regler.

5.4.1 Beschreibung des Verfahrens

Um einen Zusammenhang zwischen den Größen k_{pj} der Regler und den Einflüssen zu erhalten, wird in einem ersten Schritt ein Referenzpunkt $x_s = x_{s\text{ref}}$ auf der Trajektorie festgelegt. Für $x_s = x_{s\text{ref}}$ werden sämtliche Parameter der Gleichung (5.13) bestimmt.

$$z_j(x_s) = \frac{F_j(x_s)}{-k_{sj}(x_s) + k_{ij}(x_s) k_{pj}} \quad (5.13)$$

Aus der Gleichung (5.13) und den berechneten Parametern setzt sich die Referenzgleichung 5.14 zusammen. Die sich am gewählten Referenzpunkt bildende Auslenkung z_{ref} , aus diesen Parametern und dem zu wählenden $k_{p\text{ref}}$ stellt die Vorgabe für die einzuhaltende konstante Höhe des Trajektorienverlaufs dar.

$$z_{\text{ref}} = \frac{F_{\text{ref}}}{-k_{s\text{ref}} + k_{i\text{ref}} k_{p\text{ref}}} \quad (5.14)$$

In einem folgenden Schritt wird die Gleichung (5.13) mit der Referenzgleichung (5.14) gleichgesetzt, da $z_j(x_s)$ für alle Positionen von x_s gleich dem Referenzwert z_{ref} sein soll. Durch Umstellen nach k_{pj} entsteht die Gleichung (5.15). Diese bildet den Zusammenhang zwischen allen Einflussgrößen und den Reglerparametern k_{pj} in Abhängigkeit von der Position x_s ab.

$$k_{pj}(x_s) = \frac{\frac{F_j(x_s)}{F_{\text{ref}}} (-k_{s\text{ref}} + k_{i\text{ref}} k_{p\text{ref}} + k_{sj}(x_s))}{k_{ij}(x_s)} \quad (5.15)$$

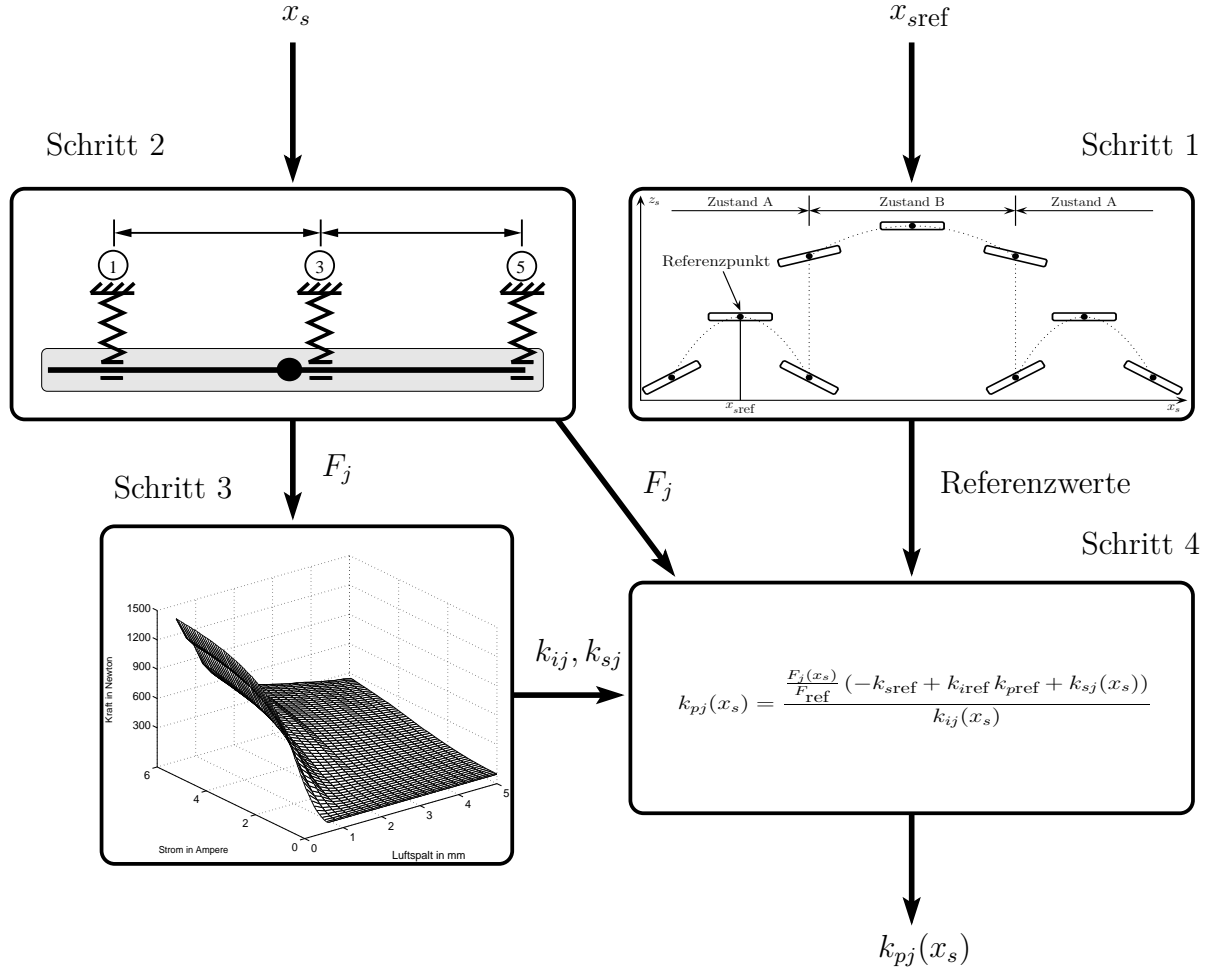
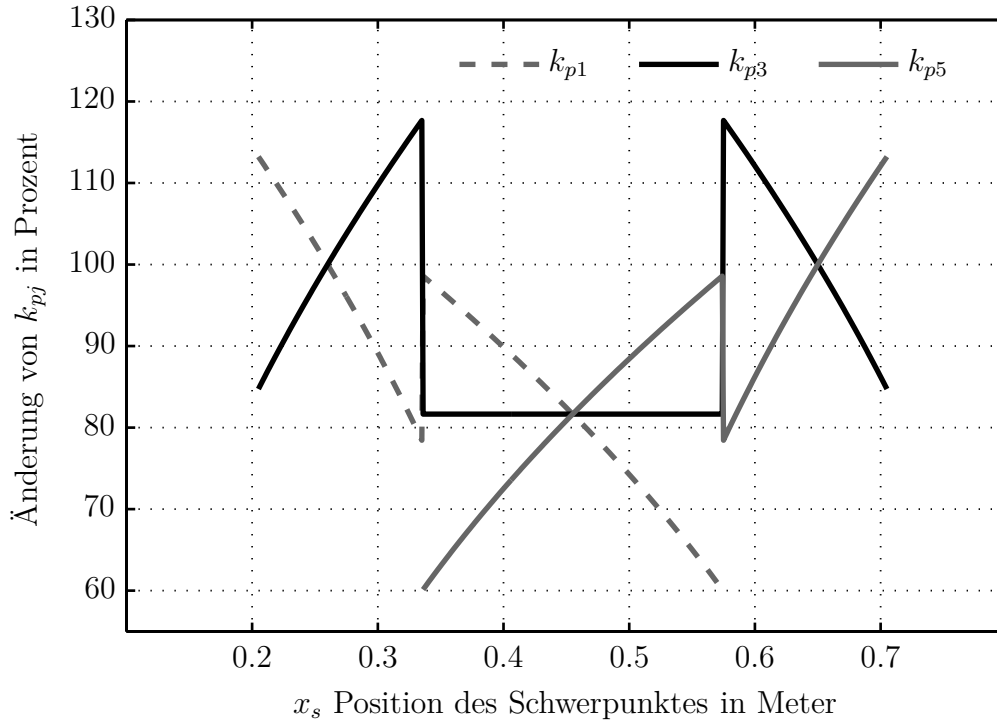


Abbildung 5.15: Ablauf des Adaptionsverfahrens

Die Auswertung der Gleichung (5.15) erfolgt Schrittweise, wie in Abbildung 5.15 dargestellt ist, für alle möglichen Positionen x_s der Platte und alle Führungen j .

Im ersten Schritt des Adaptionsverfahrens wird der Referenzpunkt auf der Trajektorie gewählt. Hieraus werden die Referenzwerte für Gleichung (5.15) berechnet. In einem zweiten Schritt werden für alle Positionen x_s der Platte die Lagerkräfte F_j aller Führungen rechnerisch bestimmt. Dies erfolgt, wie in Abschnitt 5.2.2 beschrieben. Mittels der Kräfte und der angestrebten Auslenkung z_{ref} werden die Arbeitspunkte der elektromagnetischen Aktoren der Führungen festgelegt. Unter Verwendung des in Abschnitt 4.2.2 vorgestellten Polynoms können für alle Aktoren die Parameter k_{sj} und k_{ij} bestimmt werden. In einem letzten Schritt werden mittels der Gleichung (5.15) unter Einbeziehung der Referenzwerte für alle Führungen die Parameter $k_{pj}(x_s)$ bestimmt. Die Verläufe von $k_{pj}(x_s)$ sind in Abbildung 5.16 für die Führungen eins, drei und fünf dargestellt. Die Verläufe für die Führungen zwei, vier und sechs sind aufgrund des symmetrischen Aufbaus


Abbildung 5.16: Verlauf der Parameter k_{pj} über x_s

identisch. Dabei sind die Verläufe auf das am Referenzpunkt wirkende k_{pref} normiert, um die prozentuale Änderung sichtbar zu machen.

Die Verläufe in 5.16 zeigen, wie das Verfahren auf die Änderung der Einflüsse reagiert. Deutlich tritt der Unterschied in den Reglerparametern zwischen den Zuständen A und B hervor. Hier wird aufgrund der unterschiedlichen Anzahl der Aktoren die Größe der Reglerparameter abgesenkt, um eine konstante Auslenkung beizubehalten. Innerhalb der Zustände reagiert das Verfahren auf den sich bewegenden Schwerpunkt durch die stetige Ab- und Anhebung der Größe der Parameter. Bei genauer Betrachtung fällt zudem die Krümmung der Kurven innerhalb der Zustände auf. Diese entstehen durch die Nichtlinearität der Aktoren. Die berechneten Größen für k_{pj} werden als Wertetabelle mit der Position x_s als Index gespeichert. Diese kann für die Regler innerhalb der Simulation und am Prüfstand genutzt werden, um abhängig von der Position die notwendigen Werte für k_{pj} der Reglern zu steuern, wie dies in Abbildung 5.14 dargestellt ist.

5.5 Randbedingungen des Verfahrens

Randbedingungen für das Verfahren sind

- die Schrittweite der Hilfsgröße x_s bei der Berechnung der Reglerparameter k_{pj} ,
- die Wahl des Referenzpunktes für das Verfahren und
- die Kontrolle der Plausibilität der Sensorsignale an den Positionen der Zustandsänderungen.

5.5.1 Wahl der Schrittweite

Zwischen den berechneten Werten für k_{pj} wird linear interpoliert. Je größer die Schrittweite für x_s bei der Berechnung des Adaptionsverfahrens gewählt wird, desto größer werden die Abweichungen von den Krümmungen der Kurven in Abbildung 5.16. Als eine sinnvolle Vorgabe für die Schrittweite kann die Auflösung des Sensors dienen, der die Position der Platte in Transportrichtung misst. Eine kleinere Schrittweite ist aus technischer Sicht nicht sinnvoll, da diese Informationen nicht genutzt werden können, die Genauigkeit des Verfahrens zu steigern. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit die Schrittweite gleich groß wie die Auflösung des Lasersensor aus Abschnitt 3.3.2 gewählt. In diesem Fall entfällt die Interpolation zwischen den berechneten Werten, da für jede zu messende Position x_s ein Wert k_{pj} vorliegt.

5.5.2 Wahl des Referenzpunktes

Als Referenzpunkt x_{ref} wird die Stelle des Maximums der Auslenkung z_s im Zustand A in Abbildung 5.12 festgelegt. An dieser Position steht der Schwerpunkt der Platte mittig zwischen den ersten vier Führungen. Der Vorteil dieses Punktes ist, dass sich das System in einem Gleichgewicht befindet, an dem alle aktiven Führungen gleiche Arbeitspunkte aufweisen und die gleiche Last zu tragen haben. Zudem sind alle Auslenkungen z_j gleich groß und der Winkel ρ beträgt null. Ansonsten kann es sein, dass der Winkel ρ innerhalb des Verfahrens korrigiert werden muss.

5.5.3 Beeinflussung der Sensorsignale durch die Transportbewegung

An den Positionen der Zustandsänderungen fährt die Platte in eine Führung ein, oder verlässt diese. Dabei überstreicht die Kante der Platte die Sensorfläche und führt zu nicht plausiblen Signalen für die Auslenkungen z_j . Da an diesen Positionen zugleich auch die höchsten Gradienten in den Kennlinien für die Parameter k_{pj} der einzelnen Regler vorkommen, kann dies zu Störungen des Transportablaufs führen. Aus diesem Grund muss verfahrenstechnisch sichergestellt werden, dass nur plausible Signale der Sensoren Anwendung finden. Dazu wird die Platte für das Adaptionverfahren virtuell um die Länge $2L_S$ gekürzt. Die Länge L_S hängt von dem Durchmesser eines Sensors ab. Mit der verbleibenden aktiven Länge der Platte werden die Umschaltzeitpunkte für die Adaption berechnet. Hierdurch ergibt sich am Anfang und am Ende der Platte eine passive Länge, die bei einem Zustandswechsel in die Führung einfährt, bevor die Umschaltung der Reglerparameter vorgenommen wird. Die Sensorfläche wird somit zum Umschaltzeitpunkt vollständig von der passiven Länge der Platte bedeckt und liefert ein plausibles Positionssignal.

5.6 Fazit

Dieses Kapitel beschreibt zu Beginn den Transportvorgang der Platte. Durch die Betrachtung der Lagerungszustände, während des Transportes, wird dargestellt, dass mindestens sechs aktive Führungen benötigt werden, um einen Transportweg von $2\Delta x$ zurück legen zu können. Die weiteren Ausführungen zeigen, wie die Eigenschaften des Transportsystems, im speziellen die Trajektorie des Schwerpunktes der Platte, von den unterschiedlichen Zuständen während des Transportvorgangs abhängen. Es lässt sich ein mathematischer Zusammenhang finden, der beschreibt wie die Reglerparameter verändert werden müssen, um die Auslenkungen an den Führungen konstant zu halten. Das entwickelte Adaptionverfahren wendet diesen mathematischen Zusammenhang auf alle am Transport beteiligten Führungen an und berechnet für alle möglichen Transportpositionen der Platte einen Satz an Reglerparametern, um die Trajektorie der Platte konstant zu halten. In einem nächsten Schritt muss das Verfahren validiert werden, damit Aussagen zur Zuverlässigkeit und Wirksamkeit getroffen werden können.

6 Anwendung des Verfahrens und experimentelle Validierung

Zur Validierung wird das Adaptionverfahren in einem ersten Schritt auf das Modell des Transportsystems angewendet. Hierbei kommt es darauf an zu testen, ob der Ablauf des Verfahrens funktioniert und sinnvolle Ergebnisse liefert. In einem zweiten Schritt wird das Verfahren an dem Prüfstand umgesetzt und getestet, in wie weit die Funktion unter realen Bedingungen gegeben ist. In beiden Anwendungsfällen werden die Änderungen in den Auslenkungen ρ und z_s des Schwerpunktes für einen Transportvorgang, mit und ohne Adaption, betrachtet.

6.1 Validierung am Modell

Die Validierung des Adaptionverfahrens wird mittels des in Abschnitt 4.4 vorgestellten Modells durchgeführt. Dafür wird jeweils ein Transportvorgang mit und ohne Adaption simuliert, wobei zwei Zustandsänderungen von A nach B nach A durchfahren werden. Die Randbedingungen für die Simulationen sind in beiden Fällen identisch.

In Abbildung 6.1 ist die Auslenkung z_s für den Fall mit Adaption und für den Fall ohne Adaption, für einen Transportvorgang mit zwei Zustandsänderungen, dargestellt. In dem Verlauf ohne Adaption sind die in Abschnitt 5.1 beschriebenen Auswirkungen auf die Trajektorie deutlich erkennbar. Es zeigen sich die charakteristischen parabelförmigen Verläufe und die Niveauunterschiede zwischen den beiden Zuständen A und B. Aus dem Verlauf der Auslenkung mit Adaption der Reglerparameter lässt sich erkennen, dass die Auswirkungen der Einflüsse auf die Auslenkung in allen Zuständen durch die Adaption minimiert werden. Die auftretenden Änderungen im Verlauf von z_s für die Adaption sind deutlich geringer als für den Fall ohne Adaption. Der Referenzpunkt für das Verfahren liegt, wie in Abbildung 5.15 dargestellt, an dem Scheitelpunkt der ersten Parabel in Zustand A. Die an dieser Stelle x_{ref} vorhandene Auslenkung z_{ref} wird durch das Adaptionverfahren, mit kleinen Abweichungen, während des gesamten Transportvorgangs eingehalten. Quantitativ liegen die Unterschiede zwischen den maximalen und minimalen Werten der Verläufe für die Auslenkung z_s für den Fall ohne Adaption bei ca. $1,75 \cdot 10^{-4}$ Meter. Für den Fall mit Adaption reduziert sich dieser Wert auf $0,2 \cdot 10^{-4}$

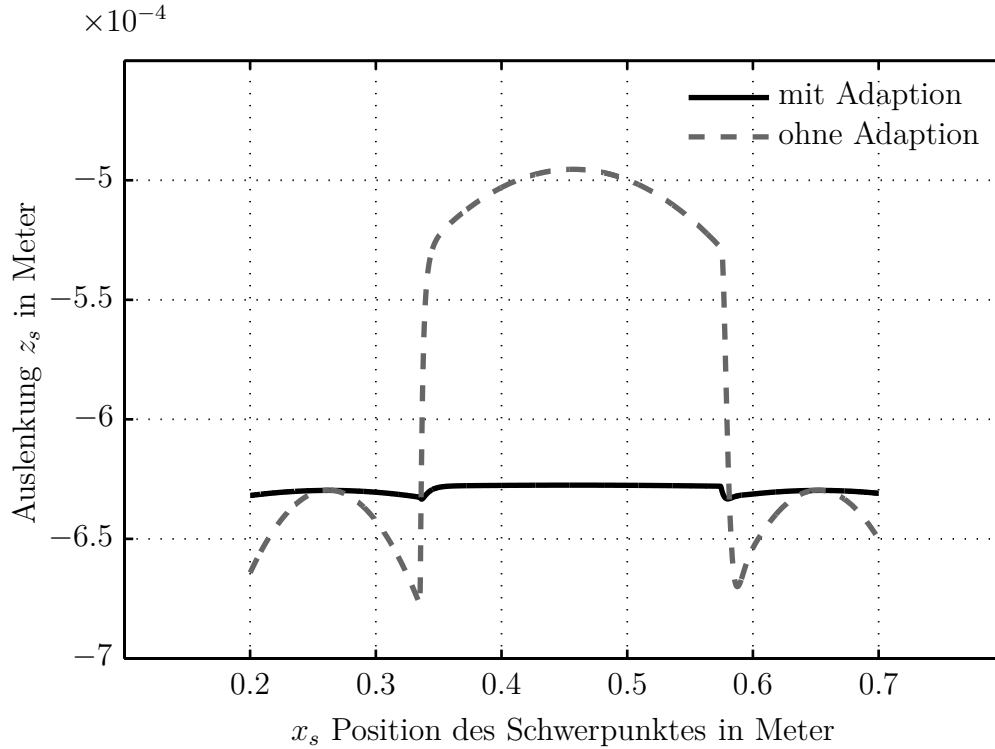


Abbildung 6.1: Vergleich der Auslenkung der Simulation mit und ohne Adaption

Meter.

Ein ähnliches Ergebnis, wie das für die Auslenkung z_s , zeigt die Abbildung 6.2 für die Auslenkung ρ . Die Änderungen im Verlauf des Winkels, während eines Transportvorgangs, werden durch die Anwendung des Adaptionverfahrens deutlich reduziert. Nur im Bereich der Zustandswechsel ergeben sich kleine Unstetigkeiten im Verlauf. Als Ergebnis aus der Validierung am Modell lässt sich festhalten, dass das Adaptionverfahren funktioniert und grundsätzlich in der Lage ist, die Auswirkungen der Einflüsse auf die Trajektorie zu unterdrücken. Die minimalen Abweichungen in den Kennlinien für ρ und z_s mit Adaptionverfahren entstehen durch die Linearisierung des Aktorverhaltens bei der Berechnung der Aktorparameter k_i und k_s .

6.2 Validierung am Prüfstand

Die experimentelle Validierung findet an dem in Kapitel 3 beschriebenen System statt. Dafür wird jeweils ein Transportvorgang mit zwei Änderungen des Zustandes, von A nach B nach A, mit und ohne Adaption durchfahren. Die Randbedingungen für beide

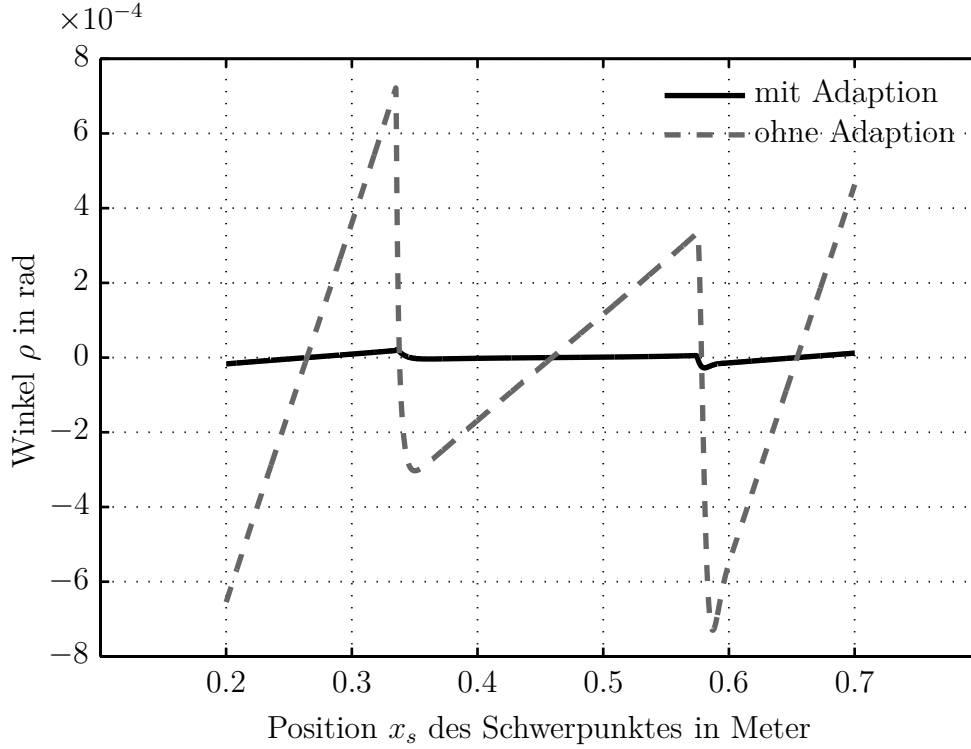


Abbildung 6.2: Vergleich des Winkels der Simulation mit und ohne Adaption

Transportvorgänge sind auch hier identisch.

In Abbildung 6.3 sind die Auslenkungen z_s des Schwerpunktes dargestellt. Für den Fall ohne Adaption hängt die Auslenkung stark von den in Abschnitt 5.2 beschriebenen Einflüssen ab. Es sind die charakteristischen parabelförmigen Verläufe und der Sprung zwischen den Zustandswechseln zu erkennen. Für den Fall mit Adaption der Reglerparameter funktioniert in Zustand A die Adaption in gleicher Qualität, wie auch in den zuvor gezeigten Ergebnissen der Simulation. Die Änderung der Trajektorie wird innerhalb des Zustandes A fast vollständig unterdrückt. Zudem wird auch hier der gewählte Referenzwert innerhalb des Zustandes A eingehalten. Innerhalb des Zustandes B wird der Sprung des Niveaus durch die Adaption der Reglerparameter ausgeglichen. Auch hier nähert sich, wie in Zustand A, die Auslenkung dem Referenzwert z_{ref} an. Als nicht optimal stellen sich die Übergänge der Zustände von A nach B und von B nach A da. An beiden Positionen des Zustandswechsel sind Sprünge in dem Verlauf der Auslenkung zu erkennen, die in den Verläufen der Simulationsergebnisse in dieser Art nicht auftreten.

Die Ursache für die Sprünge während der Zustandswechsel sind Positionsfehler in der Ausrichtung der Sensoren und Aktoren in Richtung der z Koordinate des Prüfstandes. Es können z.B. Fehler in der Positionierung eines Aktors oder Sensors auftreten, wie in Abbildung 5.5, für die Führung drei dargestellt, ist. In diesem Fall wird beim Einfahren der

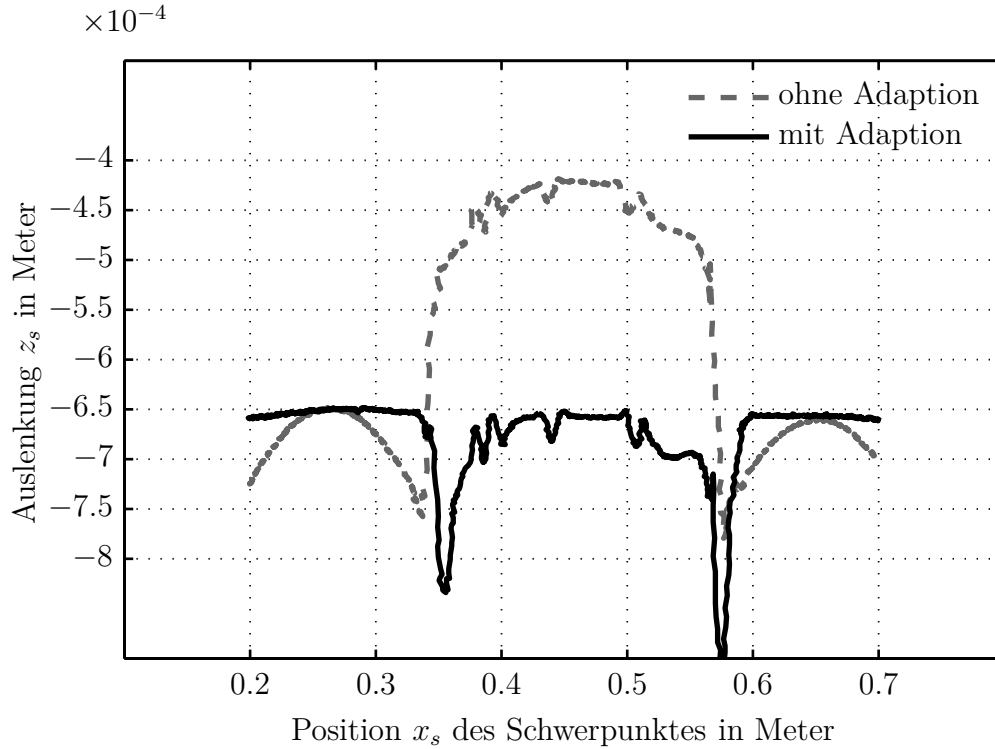


Abbildung 6.3: Vergleich der Auslenkung der Messung mit und ohne Adaption

Platte in Führung drei keine ausreichende Haltekraft erzeugt, da die Regelabweichung zu klein ist. Erst mit dem Absenken der Platte in die negative z_3 Richtung wächst die Regelabweichung an und stellt über den Regler die notwendige Haltekraft für die statische Ruhelage. Für eine Durchfahrt mit einer konstanteren Trajektorie müssten die Aktoren und Sensoren genauer zueinander positioniert werden, als dies momentan möglich ist. Aufgrund des verwendeten mechanischen Aufbaus ist eine genauere Positionierung als $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ Meter nicht möglich. Daher lassen sich diese Sprünge am Prüfstand nicht vollständig vermeiden.

Die Verläufe der Auslenkungen des Winkels ρ in Abbildung 6.4 zeigen prinzipiell das gleiche Verhalten wie die Auslenkungen der Koordinate z_s des Schwerpunktes in Abbildung 6.3. Für den Zustand A entspricht die Unterdrückung der Änderung den Ergebnissen aus den Simulationen des Modells. Für den Zustand B trifft dies nicht zu. Die Gründe hierfür entsprechen denen, die für den Verlauf der Auslenkung z_s genannt werden.

Insgesamt lässt sich für die Messungen am Prüfstand festhalten, dass die Adaption der Reglerparameter auch hier die Wirkung der Einflüsse auf die Trajektorie deutlich vermindern kann. Durch die am Prüfstand vorhandenen Fehler in der Ausrichtung der Aktoren und Sensoren ist das Ergebnis qualitativ etwas schlechter als das des Modells. Dies wird speziell an den Zustandswechseln deutlich, da hier das Adaptionsverfahren von der Güte der Ausrichtung der Führungen zueinander abhängt.

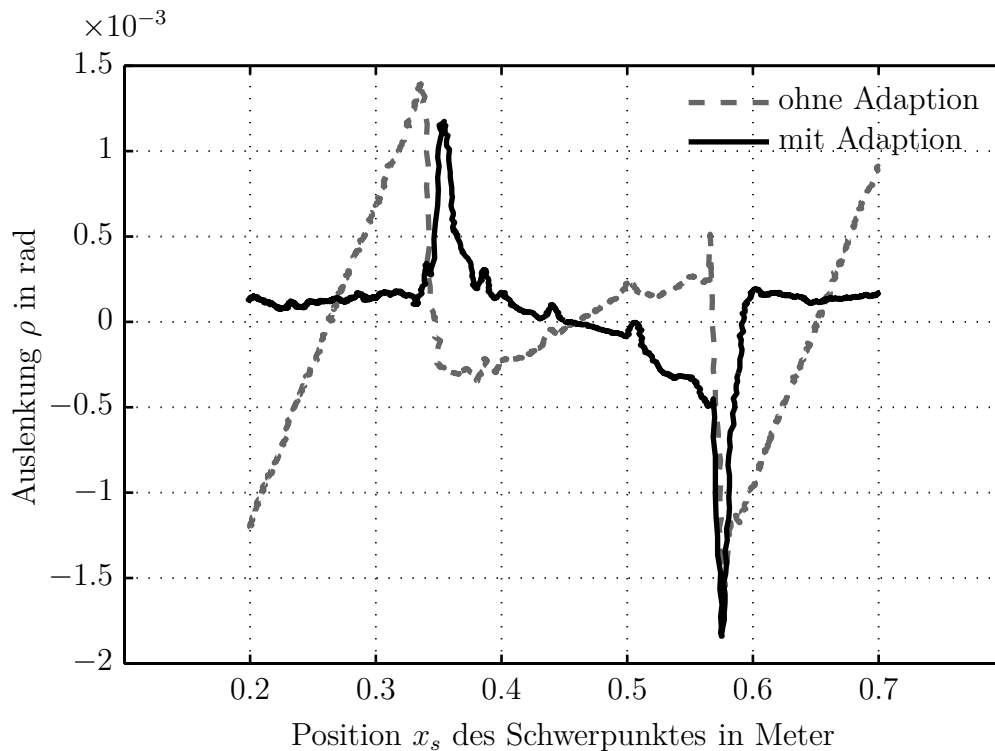


Abbildung 6.4: Vergleich des Winkels der Messung mit und ohne Adaption

6.3 Beurteilung der Ergebnisse und Fazit

Das Adaptionsverfahren, das aus der Analyse der Abhängigkeiten der Eigenschaften von den Einflüssen des Systems entstanden ist, wurde in einem ersten Schritt auf korrekte Funktionsweise an einem Modell validiert. Das Verfahren liefert für die Simulation plausible Ergebnisse und zeigt das Potential des Verfahrens auf, die Eigenschaften des Gesamtsystems mit einer geringen Anzahl an aktiven Führungen positiv zu beeinflussen. Durch das Adaptionsverfahren können die Einflüsse auf die Trajektorie, die aus dem prinzipiellen Systemaufbau entstehen, unterdrückt werden. Die Messungen an einem Prüfstand bestätigen die Ergebnisse der Simulation. Allerdings fallen bei dem Einsatz unter realen Bedingungen auch Schwächen des Verfahrens auf. Das Potential des Adaptionsverfahrens steht in engem Zusammenhang mit der erreichbaren Genauigkeit bei der Positionierung der einzelnen Führungen zueinander. Fehler bei der Justage treten in der Trajektorie des adaptierten Systems deutlich zu Tage. Die Größe des entstehenden Fehlers in der Auslenkung am Prüfstand von $2,5 \cdot 10^{-4}$ Metern wäre für ein Produktivsystem an der Grenze dessen, was durch die Spezifikation erlaubt ist. Für solche Anwendungen sollte daher bereits in der Konzeptphase darauf geachtet werden, Positionierungsfehler durch Justagemöglichkeiten ausgleichen zu können. Eine andere Lösung für die Problematik der fehlerhaften Ausrichtung ist die Möglichkeit, diese als Einflussgröße zu erfassen und

in das Adaptionsverfahren zu integrieren. Hierfür wäre nach dem Aufbau des Systems eine Referenzfahrt notwendig, bei der mittels eines Referenzmesssystems und der Wahl eines Bezugspunktes sämtliche Offsetwerte der einzelnen Führungen vermessen werden. An Hand dieser Informationen kann der Fehler aus der Justage durch das Adaptionsverfahren ausgeglichen und die Güte des Verlaufs der Trajektorie verbessert werden. Der Vorteil dieser Vorgehensweise wäre, die Lösung des Problems einmalig in Software auszuführen, anstatt bei jeder zu verbauenden Führung eine Feinjustage durchführen zu müssen.

7 Zusammenfassung

Partikelfreiheit ist für Transportsysteme bei der Verwendung in Reinräumen ein wichtiges Kriterium, was die Auswahl des Verfahrens für die Übertragung der Lagerkräfte betrifft. Magnetgelagerte Systeme sind wegen ihrer berührungslosen Lagerung und der damit verbundenen Verschleiß- und Abriebsfreiheit für solche Einsatzgebiete prädestiniert. Für den Aufbau solcher Systeme werden ortsfeste, aktive Führungen, die entlang einer Transportbahn befestigt sind, verwendet. Die einzelnen Führungen bestehen aus einem nichtlinearen, elektromagnetischen Aktor, einem Positionssensor und einem Leistungsverstärker. Das zu transportierende Objekt ist ein rein passiver Körper, welcher durch die Lagerkräfte der Führungen berührungslos getragen und geführt wird. Der Vorteil dieser Bauweise besteht in der ortsfesten Verkabelung für die Versorgung der aktiven Führungen mit Energie. Der Nachteil einer solchen Bauweise besteht in dem sich ändernden Systemverhalten infolge der Transportbewegung, da sich der Schwerpunkt des Transportobjektes relativ zu den ortsfesten Führungen bewegt. Die Änderung des Systemverhaltens bewirkt einen nicht konstanten Verlauf der Trajektorie des Transportgutes.

Das Ziel dieser Arbeit ist, mittels eines geeigneten Regelungskonzeptes und denen im mechatronischen System vorhandenen elektromagnetischen Aktoren, dass Systemverhalten aktiv zu beeinflussen, um die Änderungen des Systemverhaltens kompensieren zu können. Dabei sollen nur so viele Aktoren verwendet werden, wie zur Führung und Übergabe des Transportobjektes zwischen den einzelnen Führungen unbedingt nötig sind.

Es wurde ein Prüfstand aufgebaut, der die strukturelle Bauweise eines magnetgeführten Transportsystems aufweist. Durch Experimente am Prüfstand konnte ein Simulationsmodell des Transportsystems validiert werden. Mit dessen Hilfe ist es möglich, die Abhängigkeiten zwischen den, sich mit der Transportbewegung ändernden Einflüssen und den Eigenschaften abzubilden. Die Untersuchungen zeigen, wie die sich mit der Transportbewegung ändernden Einflüsse, wie

- Änderung der Anzahl der aktiven Führungen,
- Änderung der Lastverteilung und
- Änderung des nichtlinearen Aktorverhaltens der elektromagnetischen Aktoren der Führungen,

die Eigenschaften des Transportsystems beeinflussen. Als Eigenschaften wurden für das Transportsystem die Starrkörpermoden des zu transportierenden Körpers und die Auslenkungen des Schwerpunktes des Körpers betrachtet.

Durch die Analyse der Zusammenhänge zwischen der Transportbewegung und den sich ändernden Einflüssen und Eigenschaften war es möglich, ein adaptives Regelungskonzept auf Basis eines Gain Scheduling Verfahrens zu entwickeln. Durch das Verfahren werden die Änderungen der Einflüsse auf die Eigenschaften berücksichtigt und mittels der elektromagnetischen Führungen kompensiert. Aufgrund der Abhängigkeit der Einflüsse von der Transportbewegung und damit von der Position des Schwerpunktes des Transportobjektes, wurde diese Größe als Hilfsgröße zur Steuerung des adaptiven Regelungsverfahrens ausgewählt.

Mit dem erstellten Verfahren ist es möglich, die notwendigen Reglerparameter zu berechnen und als positionsindexierte Wertetabellen abzulegen. Diese können sowohl für die Simulation, als auch am Prüfstand eingesetzt werden, um das Verhalten des Systems zu beeinflussen.

Das Verfahren wurde am Modell und am Prüfstand getestet und ein Vergleich zwischen den Transportbewegungen, mit und ohne Adaption, erstellt. In den durchgeführten Untersuchungen zeigt das Verfahren am Modell wie auch am Prüfstand, dass es möglich ist, unter Verwendung der minimal notwendigen Anzahl an aktiven Führungen, die Trajektorie so zu beeinflussen, dass ein konstanter Verlauf während des gesamten Transportvorgangs entsteht. Allerdings machen die Experimente am Prüfstand auch deutlich, dass die Güte des Verfahrens von der Ausrichtung der Führungen zueinander abhängt. An den Übergabepunkten zwischen den einzelnen Führungen entstehen Sprünge im Verlauf der Trajektorie. Diese sind auf Justagefehler von Sensoren und Aktoren zurückzuführen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es möglich ist, mit Hilfe der im Transportsystem verbauten aktiven Führungen, das Systemverhalten aktiv zu beeinflussen und die Änderungen zu kompensieren. Ein besonderes Augenmerk muss aufgrund des adaptiven Regelungskonzeptes auf die Ausrichtung der Führungen zueinander gelegt werden, da dies die Güte des Verfahrens deutlich beeinflusst. Eine Möglichkeit dies zu realisieren, wäre für weiterführende Arbeiten eine Erweiterung des adaptiven Regelungsverfahrens um die Möglichkeit, Fehler in der Justage, durch Anpassen der Reglerparameter und der Sollwerte, für die einzelnen Regelkreise zu berücksichtigen. Weiterhin wäre der Einsatz in einem produktiven Umfeld sinnvoll, um die Tauglichkeit des Verfahrens zu überprüfen.

Literaturverzeichnis

- [1] AENIS, Martin: *Einsatz aktiver Magnetlager zur modellbasierten Fehlerdiagnose in einer Kreislaspumpe*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2002
- [2] AZUKIZAWA, Teruo ; MORISHITA, Mimpei ; KANDA shuji ; TAMURA, Noboru ; YOKOYAMA, Toyohiko: A Linear Induction Motor Control System for Magnetical-ly Levitated Carrier System. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 38 (1989), Nr. 2, S. 102–108
- [3] Schutzrecht DE 3239328 (1982). BECKER, Willi (Erfinder); Arthur Pfeiffer Vaku-umtechnik Wetzlar GmbH (Anmelder).
- [4] BERNSTEIN, Dennis S.: *Matrix Mathematics*. Princeton University Press, 2005
- [5] BLEULER, Hannes ; COLE, Matthew ; KEOGH, Patrick ; LARSONNEUR, René ; MASLEN, Eric ; NORDMANN, Rainer ; OKADA, Yohji ; SCHWEITZER, Gerhard ; TRAXLER, Alfons ; SCHWEITZER, Gerhard (Hrsg.) ; MASLEN, Eric H. (Hrsg.): *Magnetic Bearings*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- [6] BUTZEK, Norman: *Modellbasierte Verfahren zur online Fehlerdiagnose an einer Kreislaspumpe in aktiven Magnetlagern*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2009
- [7] BÖCKER, J. ; HARTMANN, I. ; ZWANZIG, Ch.: *Nichtlineare und adaptive Rege-lungssysteme*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo, 1986
- [8] C.T., Kelly.: *Iterative Methods for Optimization*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, 1999
- [9] EARNSHAW, Samuel: On the Nature of the Molecular Forces Which Regulate the Constitution of the Luminifereous Ether. In: *Transactions of the Cambridge Phi-losophical Society* Bd. 7, 1842, S. 97–112
- [10] EHMANN, Christian ; AENIS, Martin: Contactless, Particle-free Transportation System Using Magnetic Levitation. In: *The 9th International Conference on Motion and Vibration Control*, 2008

- [11] FÖRCH, Peter: *Dynamische Untersuchung an rotierenden Strukturen mittels Magnetlager*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 1999
- [12] GOTTZEIN, Eveline: *Das Magnetische Rad als autonome Funktionseinheit modularer Trag- und Führsysteme für Magnetbahnen*, Technische Universität München, Diss., 1983
- [13] GRÖNING, Ingolf: *Magnetische Lagerung für ein autonomes Transportsystem mit normalkraftbehaftetem Linearantrieb*, RWTH Aachen, Diss., 2000
- [14] HAGEDORN, Peter: *Technische Mechanik*. Bd. 1 Statik. Verlag Harri Deutsch, 2006
- [15] HAGEDORN, Peter: *Technische Mechanik*. Bd. 3 Dynamik. 2006
- [16] HEIMANN, Bodo ; GERTH, Wilfried ; POPP, Karl: *Mechatronik*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 1998
- [17] HERRMANN, Marcus: *Entwurf, Berechnung und Regelung magnetischer Reluktanzaktoren*, Technische Universität München, Diss., 2008
- [18] HOFFMANN, Karl-Josef: *Integrierte aktive Magnetlager*, TU-Darmstadt, Fachbereich Mechanik, Diss., 1999
- [19] ISERMANN, Rolf: *Digitale Regelsysteme*. Band II. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo, 1987
- [20] Schutzrecht 643316 (1934). KEMPER, Hermann (Erfinder).
- [21] KERN, Simon: *Erhöhung der Prozessstabilität durch aktive Dämpfung von Frässpindeln mittels elektromagnetischer Aktoren*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2008
- [22] KISTLER INSTRUMENTE AG WINTERTHUR (Hrsg.): *3-Komponenten-Dynamometer Typ 9257B*. CH-8408 Winterthur: Kistler Instrumente AG Winterthur
- [23] KLESEN, Christof: *Besonderheiten kompakter Magnetlager am Beispiel eines berührungsfreien Transportsystems für das Ultra-Hoch-Vakuum*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2010
- [24] KLESEN, Christof ; NORDMANN, Rainer: Dynamische Kräfte elektromagnetischer und Elektrodynamischer Aktoren in mechatronischen Systemen unter Berücksichtigung der Wirbelströme. In: *Kolloquium Aktoren in Mechatronischen Systemen*, 1999, S. 143–152
- [25] KNOPF, Eric: *Identifikation der Dynamik turbulenter Gleitlager mit aktiven Magnetlagern*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2001

- [26] KNOSPE, C.: Robustness of Unbalance Rspnse Controller. In: *ISMB*, 1992, S. 580–589
- [27] KNOSPE, Carl R.: Active magnetic bearings for machining applications. In: *Control Engineering Practice* 15 (2007), 3, Nr. 3, S. 307–313. – Selected Papers Presented at the Third IFAC Symposium on Mechatronic Systems (2004), Third IFAC Symposium on Mechatronic Systems
- [28] KRÜGER, Thomas: Magnetlager - Einsatz von aktiven Magnetlagern, Stand von Forschung und Technik. In: *Forschungsheft 378, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt* (2002)
- [29] KRÜGER, Thomas: *Experimentelle Untersuchung von Quetschfilmdämpfern mit Hilfe aktiver Magnetlager*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2009
- [30] LAIER, Dirk: *Nichtlinearitäten magnetgelagerter Rotorsysteme*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 1998
- [31] LARSONNEUR, René: *Design and Control of Active Magnetic Bearing Systems for High Speed Rotation*, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Diss., 1990
- [32] LEE, Sang-Ho ; CHANG, Jeeuk ; LEE, Sang-Wook ; KIM, Oui-Serg ; CHANG, In-Bae ; HAN, Dong-Chul: Design of a Novel Permanent Magnet Biased Linear Magnetic Bearing and its Application to High-Precision Linear Motion Stage. In: *8th International Symposium on Magnetic Bearings*, 2002, S. 543–548
- [33] MASLEN, Eric: *Magnetic Bearings*. 2000
- [34] MEINS, J.: *Eletromechanik*. Teubner, 1997
- [35] MORISHITA, Mim ; AZUKIZAWA, Teruo ; KANDA, Shuji ; TAMURA, Noburu: A New Maglev System for Magnetically Levitated Carrier Systems. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 38 (89), Nr. 4, S. 230–236
- [36] NORDMANN, Rainer: *Mechatronische Systeme im Maschinenbau I*. Shaker Verlag GmbH, 2005
- [37] NORDMANN, Rainer ; BIRKHOFFER, Herbert: *Maschinenelemente und Mechatronik*. Shaker Verlag, 2001
- [38] OTA, Masato ; ANDOH, Sigenori ; INOUE, Hiroyuki: Mag-Lev Semiconductor Wafer Transporter For Ultra-High-Vacuum Environment. In: *2nd International Symposium on magnetic Bearing*, 1990
- [39] PENROSE, R.: A generalized inverse for matrices. In: *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1955, S. 406–413
- [40] ÅSTRÖM, Karl Johan ; WITTENMARK, Björn: *Adaptive Control*. Second Edition. Dover Publications, INC., Mineola, New York, 2008

- [41] RUSKOWSKI, Martin: *Aufbau und Regelung aktiver Magnetführungen*, Universität Hannover Fachbereich Maschinenbau, Diss., 2004
- [42] RÖDDER, Dieter Johannes: *Berechnung und Auslegung der berührungslosen Lagerung eines Förderfahrzeugs mit Hybridmagneten*, RWTH Aachen, Diss., 1994
- [43] SÄTTLER, Bettina: *Entwurf eines robusten, filterintegrierten Aktuatorreglers zur Erhöhung der Stabilitätsreserve bei der Dämpfung von Strukturschwingungen*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2001
- [44] Schutzrecht US 4825773 (1987). Kabushiki Kaisha Toshiba.
- [45] Schutzrecht US 0056 4105 4A (1993). Ebara Corporation.
- [46] Schutzrecht DE 10247909A1 (2002). Elektrische Automatisierungs- und Antriebstechnik EAAT GmbH Chemnitz.
- [47] SCHWEITZER, G. ; LANGE, R.: Characteristics of a Magnetic Rotor Bearing for Active Vibration Control. In: *Conference on Vibrations in Rotating Machinery* Churchill College, Cambridge, 1976, S. 301–304
- [48] SCHWEITZER, Gerhard: Active magnetic bearings – chances and limitations. In: *6th IFToMM International Conference on Rotor Dynamics*, 2002
- [49] SCHWEITZER, Gerhard ; TRAXLER, Alfons ; BLEULER, Hannes: *Magnetlager*. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1993
- [50] TRANSPRAPID INTERNATIONAL GMBH & CO. KG: *Fahren ohne Räder, fliegen ohne Flügel*. 2005
- [51] TRAXLER, Alfons: *Eigenschaften und Auslegung von berührungsfreien elektromagnetischen Lagern*, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Diss., 1985
- [52] WAHNER, Ulrich: *Linear-Magnetführung für direktangetriebene Vorschubachsen*, RWTH Aachen, Diss., 2001
- [53] ZHENG, Qinghua: Berührungslose Energieübertragung für den Transrapid 08. In: *5 Dresdner Fachtagung Transrapid*, 2005, S. 167–176
- [54] ZMOOD, R. B. ; ANAND, D. K. ; KIRK, J. A.: The influence of eddy currents on magnetiuc actuator performance. In: *Proceedings of the IEEE* Bd. 75, 1987, S. 259–260

Lebenslauf

Name	Alexander Spieß
Geburtsdatum	23.12.1975
Geburtsort	Limburg an der Lahn
1982 – 1992	Schulbesuch mit qualifiziertem Sekundarabschluss 1 in Altendiez
1996 – 1997	Schulbesuch mit Abschluss Fachhochschulreife in Limburg
1998 – 2002	Studium des Maschinenbaus an der Fachhochschule Koblenz mit der Vertiefungsrichtung Entwicklung und Konstruktion
2002 – 2004	Studium des Maschinenbaus an der TU Darmstadt mit der Vertiefungsrichtung Mechanical und Process Engineering
2004 – 2010	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mechatronische Systeme im Maschinenbau der TU Darmstadt
seit Dez. 2010	Entwicklungsingenieur bei der Adam Opel AG in Rüsselsheim